

Guido Vogt
—

**Aufstellung von Spektralwertfunktionen aus einer
Folge von Farbgleichheitseinstellungen für
Spektrallichter verschiedener Wellenlängen von
Personen mit angeborener anomaler Trichromasie
und Dichromasie**

1973
—



Digitized by the Internet Archive
in 2026

Aus der Universitäts-Augenklinik der Freien Universität Berlin
im Klinikum Steglitz

Geschäftsführender Direktor: Prof. Dr. med. HUGO HAGER

**Aufstellung von Spektralwertfunktionen aus einer Folge
von Farbgleichheitseinstellungen für Spektrallichter
verschiedener Wellenlängen von Personen mit angeborener
anomaler Trichromasie und Dichromasie**

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Medizinischen Doktorwürde
an den Medizinischen Fachbereichen
der Freien Universität Berlin

vorgelegt von

Guido Vogt

aus Glücksburg

Referent: Prof. Dr. med. HEINRICH-FRIEDRICH TIBURTIUS

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. MANFRED RICHTER

Promoviert am 29. August 1973

DK 535.345.67
612.845,5

Sonderdruck aus: DIE FARBE **23** (1974), Nr. 1/3
(Musterschmidt-Verlag Göttingen)

ISSN 0014-7680



Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fachbereiche
der Freien Universität Berlin

D 188

Inhaltsverzeichnis

A. Einleitung	1
1. Allgemeine Begriffe zur Farbe	1
1.1 Farbempfindung	1
1.2 Farbreiz	1
1.21 Spektralfarben	2
1.22 Mischfarben	2
1.3 Farbvalenz	2
2. Farbenfehlsichtigkeit	2
2.1 Einteilung der Farbenfehlsichtigkeiten	2
2.11 Erworbene Farbenfehlsichtigkeit	2
2.12 Angeborene Farbenfehlsichtigkeit	3
2.2 Vorkommen der Farbenfehlsichtigkeiten	5
2.21 Eigene Untersuchungen	5
2.22 Schulentlassungs-Untersuchungen in Berlin	6
2.23 Andere Untersuchungen	7
B. Methode	10
3. Untersuchungsmethoden für die Prüfung auf Farbenfehlsichtigkeit	10
3.1 Mit Farbtafeln	10
3.2 Farbgleichheits-Einstellungen	10
3.21 Anomaloskop	11
3.22 Dreifarben-Meßgerät (DFM)	14
4. Messung mit dem DFM und theoretische Grundlagen	17
4.1 Bedingungen für die Farbgleichheits-Einstellungen	17
4.2 Stäbchen und Zapfen in der Retina	18
4.3 Der Begriff der Farbvalenz und die Gesetze der additiven Farbmischung	19
4.4 Innere und äußere Farbmischung	21
4.5 Reduktion der Meßwerte auf gleiche Strahldichte	21
4.6 Normvalenzsystem	24
5. Durchführung der Versuche	25
5.1 Ziel der Untersuchung	25
5.2 Auswahl der Versuchspersonen	26
5.3 Durchführung der Messungen	26
5.4 Gang der Auswertung	27
C. Ergebnisse	29
6. Beschreibung der Ergebnisse	29
6.1 Ergebnisse am DFM	29
6.2 Ergebnisse der Ausgleichsrechnung	29
6.3 Besprechung der Spektralwertkurven	31
6.31 Protanopen-Kurven	31
6.32 Protanomalien-Kurven	32
6.33 Deutanopen-Kurven	37
6.34 Deutanomalien-Kurven	38
6.35 Normalen-Kurven	38
6.4 Vergleich der Kurven untereinander	38

II

7. Diskussion der Ergebnisse	40
7.1 Theorie der Farbenfehlsichtigkeiten	40
7.11 Dichromaten	40
7.12 Anomale Trichromaten	43
7.2 Prüfung der Farbenfehlsichtigkeit	44
8. Zusammenfassung	45
Anhang: Definitionen aus der Farbmeterik	46
Schrifttums-Verzeichnis	48
Lebenslauf	58

A. Einleitung

1. Allgemeine Begriffe zur Farbe

1.1: Farbempfindung

Wahrnehmung von Farbe ist eine Sinnesempfindung, eine Gesichtsempfindung, mittels der wir zwischen zwei strukturfreien Flächen gleicher Größe und Form unterscheiden können [232]. Wir benutzen dafür Wörter wie hell, dunkel (Helligkeit); gelb, blau, rot, grün (Farbton); kräftig, blaß (Sättigung). Schwarz und Weiß zählen zu den unbunten Farben und besitzen weder Farbton noch Sättigung [221a; 223].

Die Dreidimensionalität der Farbempfindung mit deren Qualitäten veranschaulicht Abb. 1 [107; 112; 144a; 221a; 233].

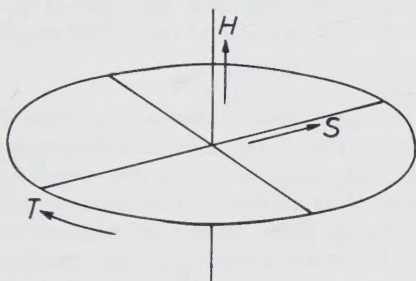


Abb. 1: Schema der Dreidimensionalität der Farbe
(T = Farbton, S = Sättigung, H = Helligkeit)

1.2: Farbreiz

Wie jede Empfindung ist auch die Farbempfindung ursächlich an einen Reiz gebunden, den Farbreiz. Dieser wird hervorgerufen durch elektromagnetische Strahlung des Wellenlängenbereichs 380 nm—780 nm, die in das Auge als das Empfängerorgan eindringt [80; 223]. Es ist also Licht, dessen Strahlung die Farbwahrnehmung hervorruft. Gelangt das Licht unmittelbar von einer Lichtquelle (Glühlampe) in das Auge, so spricht man von Lichtfarbe. Im allgemeinen ist jedoch das von einem beleuchteten Gegenstand kommende Licht Ursache einer Farbempfindung, und in diesem Fall sprechen wir von Körperfarbe. Wird das Licht, das auf nicht-selbstleuchtende Gegenstände geworfen wird, von ihnen reflektiert, wird dafür der Begriff Aufsichtfarbe benutzt; wird hingegen das Licht hindurchgelassen, spricht man von Durchsichtfarben [221a]. In dieser Arbeit sind nur die Durchsichtfarben von Bedeutung.

1.21: Spektralfarben

Weißes Licht läßt sich bekanntlich mit Hilfe eines Prismas oder Gitters in Strahlungen verschiedener Wellenlänge zerlegen, das Spektrum.

Der geometrische Ort aller Spektralfarben ist der Spektralfarbenzug in der Farbtafel der CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*) [8; 101; 107; 148; 172; 232; 233].

Der farbennormalsichtige Beobachter (= normale Trichromat) unterscheidet im Spektrum ungefähr 190 verschiedene Farbtöne [92; S. 194/195]. Davon fallen sieben auf das Violett (380 nm—431 nm), 47 auf das Blau (431 nm—486 nm), 67 auf das Grün (486 nm—575 nm), 15 auf das Gelb (575 nm—589 nm), 47 auf das Orange (589 nm—656 nm) und sieben auf das Rot (656 nm—760 nm) [141; 172].

1.22: Mischfarben

Außer den genannten Spektralfarben kennt man die Mischfarben, die durch Mischung zweier oder mehrerer Spektralfarben hergestellt werden können. Ihr geometrischer Ort befindet sich in der vom Spektralfarbenzug umschlossenen Fläche in der genannten Farbtafel [107].

Spektralfarben und Mischfarben sind reelle Farben [8].

1.3: Farbvalenz

Farbvalenz ist die unmittelbare Auswirkung eines Farbreizes auf den Empfängermechanismus des Auges. Der Empfängerapparat des Auges bewertet den Farbreiz nach (normalerweise) drei voneinander unabhängigen spektral verschiedenen Wirkungsfunktionen linear und stetig; diese Einzelwirkungen setzen sich zu einer einheitlich empfundenen, unauflösbaren Gesamtwirkung, der Farbvalenz, additiv zusammen (farbmetrisches Grundgesetz) [142; 143].

2. Farbenfehlsichtigkeit

Nun gibt es Personen, die Farben anders wahrnehmen als normale Trichromaten. Wir nennen sie farbenfehlsichtig.

2.1: Einteilung der Farbenfehlsichtigkeiten

2.11: Erworbene Farbenfehlsichtigkeit [34; 35; 49; 51; 64; 65; 100; 114; 115; 204-206; 210]

Wir unterscheiden ererbte Farbenfehlsichtigkeit von der erworbenen, die als Begleiterscheinung einer Augenkrankheit, z. B. *Glaukom* [236], *Opticus-Atrophie* [101; 102], *Maculadegeneration* [48; 52; 53; 54; 101; 102; 168], *Neuritis nervi optici* [50; 100; 101; 102], *Retinitis pigmentosa* [101], *Ablatio retinae* [101], *Papillenödem* [101], oder in Zusammenhang mit anderen Krankheiten auftreten. Wir wissen von dem Vitamin A-Depot in der Leber und der Xanthophthalmie sowie Hemeralopie bei Zerstörung des Depots durch Zirrhose oder Dystrophie [237].

Als Nebenwirkungen nach Gabe verschiedener Medikamente werden Farbenfehlsichtigkeiten beschrieben [98; 175; 186]. Genannt seien Farbenfehlsichtigkeiten nach *Antibiotika*, *Tuberkulostatika*, *Antidepressiva*, *Antirheumatica* [101]. Die erworbenen Farbenfehlsichtigkeiten lassen sich nicht klar gliedern und erstrecken sich sehr oft nicht auf das ganze Gesichtsfeld, sondern nur auf mehr oder weniger große Teile [172].

2.12: Angeborene Farbenfehlsichtigkeit [36; 91; 170; 172; 191; 193; 211]

Folgende Formen der angeborenen Farbenfehlsichtigkeit werden unterschieden:

I) Anomale Trichromaten (zuerst entdeckt von LORD RAYLEIGH [136], Begriff von A. KÖNIG [77-85; siehe ferner 3; 53; 75; 76; 88; 89; 93; 128; 129; 130; 136; 139; 155; 181; 207])

- a) Protanomale
- b) Deuteranomale
- c) Tritanomale¹

II) Dichromaten [76; 84; 92; 102; 103; 106; 117; 124; 125; 129; 130; 156; 160; 172; 191; 207; 216]

Graustelle im Spektrum
[43; 172; 191; 216]

- a) Protanope 492 nm
[137; 161; 219]
- b) Deuteranope 498 nm
[122; 137; 162; 218]
- c) Tritanope¹ 575 nm

III) Monochromaten [1; 9; 220; 221]

Ist die Farbenfehlsichtigkeit angeboren, so werden die Betroffenen nur durch Vergleiche mit Farbentüchtigten auf diesen Fehler aufmerksam. Die Störung der Farbwahrnehmung betrifft in der Regel nicht alle Farben, sondern nur den Bereich der Rot-Gelb-Grün-Empfindung. v. KRIES machte 1897 Messungen an Dichromaten, anomalen Trichromaten und Normalen und fand dabei heraus, was später wiederholt bewiesen worden ist [128-130]:

- a) Protanope akzeptieren Farbgleichheitseinstellungen von Protanomalen und Normalen.
- b) Deuteranope erkennen Farbgleichungen von Deuteranomalen und Normalen an.

Dichromaten sind ihrer Umwelt am auffälligsten wegen starker Rot-Grün-Verwechslungen:

¹ Die Tritostörungen [28, 78, 86, 171, 179, 190, 231] sind mit dem normalen Anomaloskop nicht zu erfassen, es sei denn, man rüstet es zu einem Tritoskop um [147, 194].

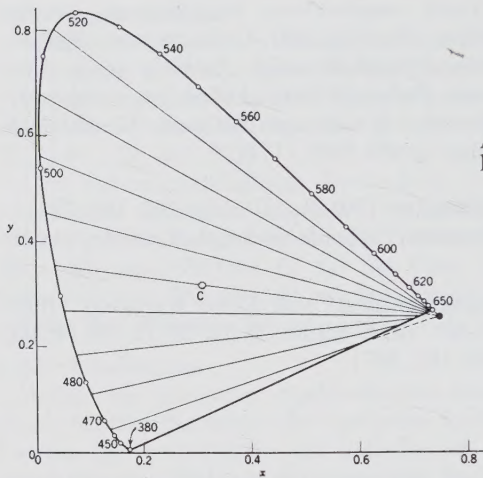


Abb. 2: Gerade der Verwechslungsfarben bei Protanopie (nach PITT [129] und JUDD [70])

- Protanope verwechseln bläuliches Rot mit reinem Blau und gelbliches Grün mit Rot.
- Deutanope verwechseln bläuliches Rot mit bläulichem Grün und außerdem, genau wie die Protanopen, gelbliches Grün mit Rot.
- Tritanope wiederum verwechseln Gelb mit Violett [141].

In Abb. 2, 3, 4 sind die Farbverwechslungsgeraden nach JUDD und PITT in der Normfarbtafel dargestellt [8; 55; 122].

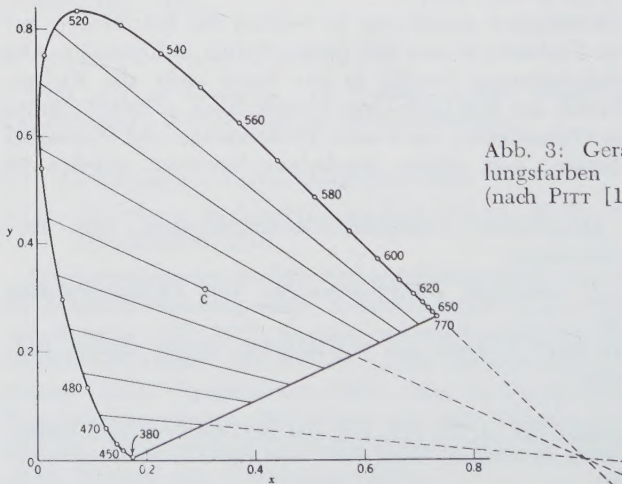


Abb. 3: Gerade der Verwechslungsfarben bei Deutanopie (nach PITT [129] und JUDD [70])

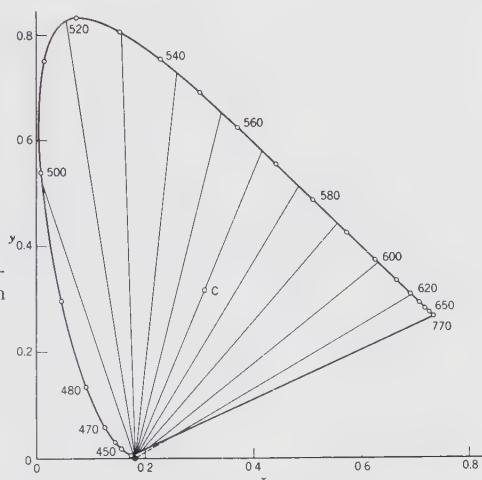


Abb. 4: Gerade der Verwechslungsfarben bei Tritanopie (nach PRTT [129] und JUDD [70])

Auch anomale Trichromaten verwechseln Farben, die auf den in Abb. 2-4 gezeigten Linien liegen. Sehr selten kommen die Monochromaten vor. Sie sind total farbenblind und nehmen ihre Umwelt nur in Hell-Dunkel-Kontrasten wahr [80].

Von den Farbenfehlsichtigen haben auch einige ein verändertes Helligkeitsempfinden. So wird von Protanopen Rot als dunkel und Grün als hell empfunden. Bei Deutanopen ist der Helligkeitseindruck für Rot, Gelb, Grün etwa gleich. Deshalb können von ihnen diese Farben weder auf Grund der Helligkeit noch des Farbunterschiedes auseinandergehalten werden [11].

2.2: Vorkommen der Farbensinnstörungen [141; 169; 172; 191; 233]

Etwa 8% der männlichen und 0,4% der weiblichen Bevölkerung Mitteleuropas sind farbenuntüchtig [11]. Dieser Unterschied zwischen dem männlichen und weiblichen Geschlecht bezüglich der Häufigkeit der angeborenen Farbenfehlsichtigkeit wird allgemein auf die rezessiv-geschlechtsgebundene Vererbung zurückgeführt [8; 70; 172; 221].

2.2.1: Eigene Untersuchung

Es waren von insgesamt 39 Farbenfehlsichtigen

Dichromaten 12 (31%), davon

Protanope 6 (15,5%)

Deutanope 6 (15,5%)

anomale Trichromaten 27 (69%), davon

Protanomale 8 (20,5%)

Deutanomale 19 (48,5%)

(davon 2 weibliche)

2.23: Andere Untersuchungen

GRAMBERG-DANIELSEN [44] fand bei 6300 untersuchten Berufsfahrern rund 8% farbenuntüchtige Männer. Die weitere Aufgliederung entsprach der allgemein bekannten Verteilung:

Protanope	15%
Protanomale	10%
Deutanope	25%
Deuteranomale	50%

M. RICHTER [141] hat bei einer Untersuchung in färberischen Betrieben gezeigt, daß die Vermutung, Farbenfehlsichtige könnten sich dort nicht halten, falsch ist (Tab. 2).

Tab. 2: Farbenfehlsichtigkeits-Untersuchungen in färberischen Betrieben
(nach RICHTER [141])

		Zahl gefunden	Proz. 100	Prozentualer Anteil nach WRIGHT	
				Männer	Frauen
Gesamtzahl der Untersuchten		1307	100	100	100
Farbennormal- sichtige	Norm. Trichromaten	1147	87,8		
	bedingt-norm. Trichr. einschl. Überträgerinnen	70	5,3	92,0	99,6
Farbenfehl- sichtige	Protanopen	11	0,8	1,0	0,02
	Protanomale	8	0,6	1,0	0,02
	Deutanopen	9	0,7	1,1	0,01
	Deuteranomale	60	4,6	4,9	0,38
	Tritanopen	—	—	0,005	0,003
	Tritanomale	2(?)	0,2(?)	*)	*)
	Totalfarbenblinde	—	—	*)	*)

*) sehr selten

Ein ähnliches Resultat ergab eine Prüfung von Fernseh-Ingenieuren einer weltbekannten Firma [33]. Aus Untersuchungen von RICKLEFS und WENDE [150; 151] muß gefolgert werden, daß ein Farbenfehlsichtiger die Anforderungen, die die Fernseh- und Radioindustrie an ihre Arbeiter stellt, nicht erfüllt. Dies gilt besonders für das Erkennen der Kennzeichnung elektrischer Widerstände.

2.3: Notwendigkeit der Prüfung auf Farbennormalsichtigkeit

Unter Farbenfehlsichtigen versteht man also Personen, die Farben anders wahrnehmen als Normalfarbsichtige oder solche, die sogar Farben verwechseln oder überhaupt nur Hell-Dunkel-Kontraste erleben. Zweifellos spielt die individuell unterschiedliche Blutfüllung und Pigmentation der Aderhaut und die (besonders im Alter zunehmende) Gelbfärbung der Augenlinse eine nicht unbedeutende Rolle, weil dadurch die spektrale Verteilung des ins Auge eingedrungenen Lichtes zugunsten der längeren Wellenlängen (gelb, rot) deutlich verändert wird [172]. Diese jedoch relativ

kleinen Schwankungen liegen noch im Bereich des normalen Farbensinns. Die aber gar nicht so seltenen exzessiven Abweichungen des Farbensinns, die bis zur völligen Farbenblindheit vorkommen, bezeichnen wir als Farbenfehlsichtigkeiten, für deren Beschreibung uns verschiedene Untersuchungsmethoden zur Verfügung stehen (siehe Abschnitt 3).

Da die vom Auge aufgenommene visuelle Information im Großhirn verarbeitet wird, setzt sich die Farbwahrnehmung aus dem Farbreiz und einer anschließenden Informationsverarbeitung zusammen, die in mehreren hintereinander geschalteten Systemen erfolgt, von denen die drei wichtigsten die *Retina* [132; 134] mit den nachgeschalteten Nervennetzen [230; 240; 250], das *Corpus geniculatum* [5; 198-202] und der *visuelle Cortex* sind [173; 174]. In diesem Sinne ist sowohl die Bedeutung der Farbwahrnehmung im Luft-, See-, Schienen- und Straßenverkehr als auch in anderen Lebensbereichen zu verstehen. Dies und die Tatsache, daß nicht alle Menschen Farbe gleich wahrnehmen, erfordern eine Prüfung auf Farbanomalsichtigkeit besonders bei den Berufsgruppen, die entweder Gegenständen oder Materialien ein farbiges Aussehen verleihen, wie z. B. Papier-, Textil-, Lackindustrie, Druckerei und Färberei etc. [141], oder farbiges Aussehen absolut oder vergleichend beurteilen (Beschäftigte im Straßenverkehr, Luft-, Schiffs-, Schienenverkehr; Beschäftigte in chemischen Untersuchungslaboratorien oder in der Radio- und Fernsehindustrie [150; 151]).

Nun schließt allerdings eine Farbenfehlsichtigkeit nicht unbedingt eine Berufs- oder Verkehrsuntauglichkeit ein. So ist vielmehr die genaue Differentialdiagnose der Farbsinnstörung zu stellen und diese dann in engem Zusammenhang mit zwei weiteren Überlegungen zu sehen [56; 183]:

1. Wieweit ist Farbensehen für die Berufstätigkeit notwendig und wieweit kann eine Farbenfehlsichtigkeit ausgeglichen werden durch Helligkeitsunterscheidung oder Unterscheidung durch die Lokalisation (z. B. bei Verkehrsampeln).
2. Wieweit spielen extreme Verhältnisse, wie das Erkennen von kleinen Farbflächen, eine Rolle. NAGEL, welcher Deuteranop war, hatte an sich beobachtet, daß er Farben besser unterscheiden konnte, sobald der Gesichtswinkel größer als 10° war [191; S. 102]. TRENDELENBURG nennt Dichromaten, bei denen das für sie typische Farbverhalten erst bei einem Gesichtswinkel von weniger als 2° in Erscheinung tritt, *inkomplette Dichromaten* [191].

Für die einfache Berufseignungsprüfung begnügt man sich mit einer Beurteilung durch Farbtafeln. In Berlin geschieht das schon routinemäßig im Rahmen einer allgemeinen Schulentlassungsuntersuchung durch Schulärzte. Für die Berufseignungsprüfung bei Eisenbahnern und Berufsfliegern ist eine Anomalskopuntersuchung vorgeschrieben [172]. Genauerem Aufschluß über die gesetzlichen Vorschriften gibt die Zusammenstellung von E. HEINSIUS (Tab. 3).

Wichtig erscheint eine Differentialdiagnose einer eventuell vorliegenden Farbenfehlsichtigkeit deswegen, weil die Protogestörten auf Grund ihrer Spektrumsverkürzung im Langwellenbereich [55; 137; 161; 227] besonders gefährdet sind und somit entweder das rote Licht überhaupt nicht sehen, oder wenn, dann zu spät, weil die Erkennung der Farbe mit anschließender Verarbeitung nicht zuletzt auch ein Zeit-, d. h. ein Geschwindigkeitsproblem darstellt. Gedacht ist hierbei in erster Linie an Auffahrunfälle [44].

Die Erkennung bzw. Verwechslung von Farben der Verkehrsampeln spielt in diesem Zusammenhang eine untergeordnete Rolle [44].

Bei den erworbenen Farbenfehlsichtigkeiten nehmen die Nebenwirkungen nach Gabe von Medikamenten [98; 175; 186] an Bedeutung zu, zumal das Farbsehen einen feinen Indikator darstellt [114].

Tab. 3: Offizielle Anforderungen an das Farbsehen in der Bundesrepublik Deutschland (1972) (nach HEINSIUS)³

Bereich	Anforderungen	Prüfverfahren
Privatkraftwagen	keine	—
Lastwagen, Taxis, Autobusse	Deutero- und Trito-Typen sowie Proto-Typen mit $AQ > 0,5$ zugelassen	Zwei geeignete Tafelproben + Anomaloskop
Eisenbahn-Personal		
Kat. A	Normal	Drei geeignete Tafelproben + Anomaloskop
Kat. B	Normal	STILLING-Tafeln + NAGEL-VIERLING-Tafeln (+ Anomaloskop in Zweifelsfällen)
Straßenbahn-Personal	Normal	Zwei geeignete Tafelproben (+ Anomaloskop in Zweifelsfällen)
U-Bahn-Personal		
Luftverkehr		
Berufs-Personal	Normal	Tafelproben + Anomaloskop)
Privat-Piloten	Anomale Trichromaten mit besonderer Genehmigung zugelassen	Tafelproben (+ evtl. Anomaloskop)
Bundeswehr	Normal	STILLING- oder ISHIHARA-Tafeln + Anomaloskop
Marine (Deck-Personal)	Normal	Zwei geeignete Tafelproben (z. B. STILLING-VELHAGEN, ISHIHARA oder BOSTRÖM) + Anomaloskop in Zweifelsfällen
Postdienst (bestimmte Dienstzweige)	Starke Farbenfehlsichtigkeiten ausgeschlossen	Tafelproben (+ Anomaloskop in Zweifelsfällen)

³ Nach: Daltoniana (Newsletter Intern. Research Group on Colour Vision Deficiencies) Nr. 4, May 1972

B. Methode

3. Untersuchungsmethoden für die Prüfung auf Farbnormalsichtigkeit

3.1 Mit Farbtafeln

Meist erfolgt die Prüfung auf Farbnormalsichtigkeit mit den pseudo-isochromatischen Farbtafeln, von denen wohl die gebräuchlichsten die von ISHIHARA, STILLING-HERTEL und VELHAGEN sind. In Tab. 4 sind Angaben über prozentuale Versager bei der Farbtafelprüfung [92; S. 104] zusammengestellt.

Tab. 4: Prozentuale Versager bei der Farbensinnprüfung mit den Farbtafeln

Tafelart	Versager in Prozenten nach		
	VIERLING	APPELS	HEINSIUS
NAGEL-VIERLING	12	—	—
COHN	8...11	—	—
STILLING, 17. Aufl.	13	—	3,35
STILLING, 19. Aufl.	—	7	12
STILLING, 20. Aufl.	—	2	0,7
ISHIHARA, 4. Aufl.	—	0	1
PODESTÀ, 2. Aufl.	—	3	4
Wollproben nach HOLMGREN	26	—	—

Für diese Arbeit wurden bei der Vorauswahl die Tafeln von ISHIHARA (Tokyo: *Kanehara Shuppan*, 6. Aufl.) und STILLING-HERTEL (Leipzig: *Georg Thieme*, 20. Aufl.) verwendet. Die Farbtafeln beruhen auf dem Prinzip der Verwechslungsfarben, die rein empirisch gefunden wurden. Diese werden in verschiedener Sättigung und Feldgröße dem Betrachter dargeboten. Häufig stellt eine Abbildung zwei verschiedene Zahlen dar, von denen die eine der Farbnormalsichtige erkennt und die andere der Farbenfehlsichtige (Vexiertafeln) [141].

Zum Zweck der Farbsehprüfung wurden die Tafeln in eine Lesevorrichtung gestellt, die es erlaubt, die Tafeln mit einer tageslichtweißen Leuchtstofflampe (Osram HNT) gleichmäßig zu beleuchten und stets unter gleichen Bedingungen zu betrachten.

Mit den Farbtafeln läßt sich rasch und ohne großen Aufwand eine Auslese von Farbnormalsichtigkeit und Farbenfehlsichtigkeit vornehmen. Eine weitere Aufschlüsselung ist mit dieser Methode nicht möglich (Ausnahme: ISHIHARA 6. Aufl. 1932, Tafeln 12 und 13, mit denen man Protoformen von Deuteroformen trennen kann).

3.2: Farbgleichheits-Einstellungen

Die sicherste Methode zur Erkennung von Farbenfehlsichtigkeiten ist es, den Prüfling zu einer gegebenen Farbe eine für ihn gleichaussehende her-

stellen zu lassen. Dazu bedarf es eines geeigneten Apparates, der additive Farbmischungen herzustellen erlaubt. Die Übereinstimmung der vom Prüfling eingestellten Mischungsbeträge mit den Durchschnittswerten von Personen, die als farbennormalsichtig bekannt sind, bzw. die Abweichungen von diesen Durchschnittswerten geben ein sicheres Bild von Art und Grad der Farbenfehlsichtigkeit des Prüflings. Das Verfahren entspricht in seiner Durchführung der Farbmessung nach dem Gleichheitsverfahren [20], hat aber eben eine andere Zielsetzung.

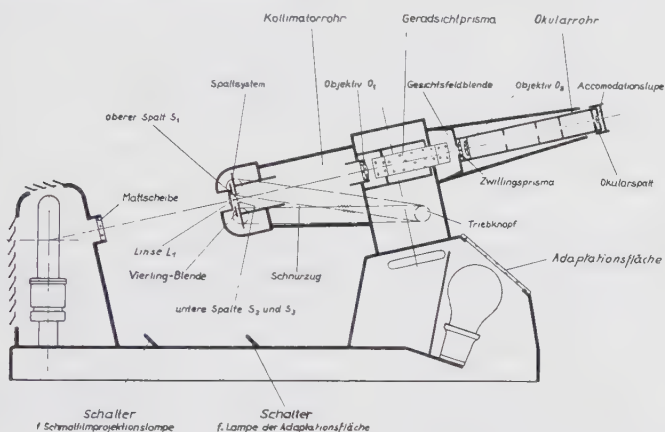


Abb. 6: Anomaloskop nach NAGEL. Moderne Ausführung (Schmidt & Haensch, Berlin)

3.21: Anomaloskop

Das von W. NAGEL [120] entworfene Anomaloskop (Abb. 6) ist ein optisches Gerät, das eine solche additive Mischung herzustellen gestattet. Bei der modernen Ausführung wird die sog. Rayleigh-Gleichung aus den spektralen Komponenten $\lambda = 546 \text{ nm}$ (Hg-Grün) und $\lambda = 671 \text{ nm}$ (Li-Rot) gegen den Farbeindruck des Na-Gelb ($\lambda = 589 \text{ nm}$) eingestellt. (Früher wurde anstelle der Wellenlänge 546 nm die der grünen Thallium-Linie (535 nm) verwendet, was aber, wie Abb. 7 erkennen läßt, zu einem immerhin merkbaren Sättigungs-Defizit Δp_e führt).

Die Rot-Grün-Mischung wird durch zwei parallel liegende Eintrittsspalten erzeugt, deren äußere Spaltbacken feststehen. Die inneren Kanten werden von einer gemeinsam mittels Feinschraube verschiebbaren Spaltbacke gebildet, durch deren Verschiebung der eine Spalt um den gleichen Betrag erweitert, wie der andere verengt wird.

Über den beiden Mischspalten S_2 und S_3 (Abb. 8) ist ein dritter, unilateraler Spalt S_1 für das Vergleichslicht angeordnet, dessen mittels Feinschraube bewegliche Spaltbacke den Gelbspalt nach der langwelligen Seite

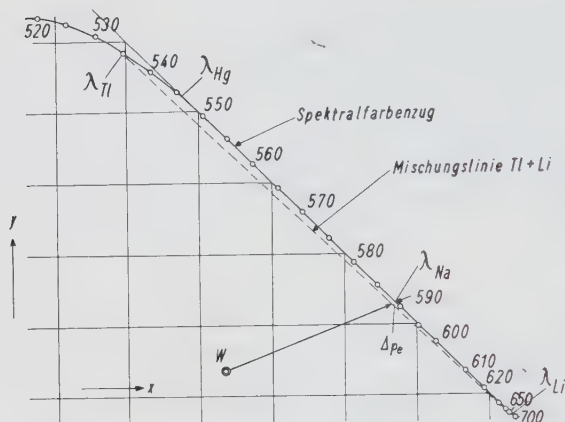


Abb. 7: Mischung der roten Li-Linie mit der grünen Hg-Linie zur Erzeugung des Farbeindrucks der Na-Linien (Darstellung als Ausschnitt aus der Normfarbtafel). Die gestrichelte Linie zeigt die Mischungslinie bei der früher üblicher grünen Tl-Linie anstelle der Hg-Linie (nach RICHTER [145])

hin öffnet. Damit wird ermöglicht, die Helligkeit des Gelbfeldes der des Rot-Grün-Feldes anzugleichen, also eine vollständige Gleichheit zwischen beiden Gesichtsfeldhälften herzustellen.

Mittels der Feinschrauben (RG, Ge) können die Spaltbreiten so eingestellt werden, daß die Rayleigh-Gleichung erhalten wird, d. h. die Mischung des grünen und des roten Spektrallichtes ergibt in der oberen Hälfte des Anomaloskop-Gesichtsfeldes ein Gelb, das mit dem gelben Spektrallicht in der unteren Gesichtshälfte übereinstimmt und die gleiche

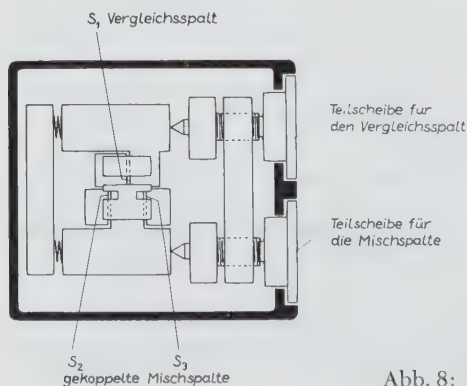


Abb. 8: Spaltanordnung beim Anomaloskop

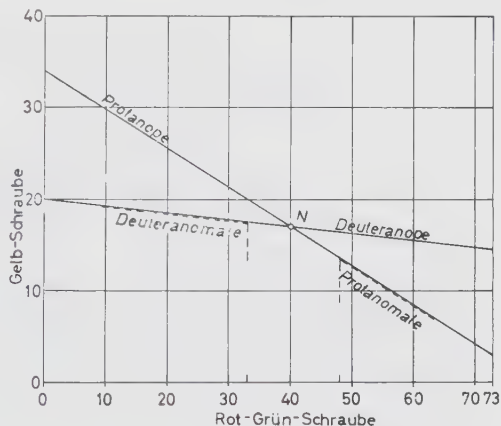
Leuchtdichte hat [39]. Das Strahldichteverhältnis der Mischlichter ist so abgestimmt, daß als Mittel mehrerer Einstellungen die Rayleigh-Gleichung

$$a \cdot \text{Rot} + b \cdot \text{Grün} = c \cdot \text{Gelb}$$

gilt. Da die Skala am Anomaloskop bei 73 endet, ist $b = 73 - a$. Für die Mittelnormeneinstellung ist $a = 40$ und $c = 15$.

Es gilt für die Untersuchung, auf Gleichheit beider Gesichtsfeldhälften einzustellen. Die Zahlenskala erlaubt es, für jedes Mischverhältnis ein Zahlenpaar anzugeben. Das Na-Gelb wird durch die Gelbschraube (Ge), die Rot-Grün-Mischung durch die Mischschraube (RG) reguliert. Das Einstellungsergebnis wird üblicherweise durch einen Bruch dargestellt, dessen Zähler die Stellung der Rot-Grün-Schraube angibt, dessen Nenner die der Gelbschraube (z. B. 40/15 für den Normalen).

Abb. 9: Anomaloskop-Einstellungen für die verschiedenen Formen der Farbenfehlsichtigkeit (schematische Darstellung ohne Berücksichtigung der Streubreiten) (nach [49a])



Bei dieser Untersuchungsmethode kann man die angeborenen, erbten Farbenfehlsichtigkeiten differentialdiagnostisch mit folgender Nomenklatur belegen:

A n o m a l e T r i c h r o m a t e n stellen gegenüber den Normalen entweder einen höheren Rotanteil ein, das sind die Protanomen (z. B. 61/9) oder einen höheren Grünanteil, das sind die Deuteranomen (z. B. 19/15). Es weicht aber nicht nur der Rot/Grün-Wert, sondern auch der Gelbwert von der Normalen-Einstellung ab.

Dichromaten erkennen die Gleichung der Normalen und der Anormalen gleichen Typs an [55; 128-130]. Sie unterscheiden sich am Anomaloskop durch ihre Helligkeitseinstellung (Gelbwert), die bei Deuteranopen recht konstant ist (0/15 bis 73/15), bei Protanopen sich aber umgekehrt proportional zum Rotanteil verhält, d. h. je mehr Rot, desto dunkler wird das Gelb eingestellt (0/33 bis 73/3) [20; 39; 141] (Abb. 9).

Bei der Anomaloskopuntersuchung wird jedes Auge einzeln geprüft. Das Auge soll helladaptiert sein. Die Einstellung der Gleichungen erfolgt bis auf Ausnahmen durch den Untersucher.

In dieser Arbeit werden nur die durch Anomaloskopprüfung definierbaren Farbensehstörungen, das sind in der Regel die angeborenen Farbsinnstörungen, berücksichtigt.

Eine Angabe über Graduierung der Anomalien erhält man, wenn man den Anomaliequotienten (AQ) berechnet. In diese Größe fließt die Mittelnormgleichung des normalen Beobachters (40/15) ein. Für die Einstellungen am Anomaloskop ergibt sich nach der v. KRIES'schen Quotientenberechnung für den AQ:

$$AQ = \left(\frac{73-P}{P} \right) : \left(\frac{73-N}{N} \right)$$

Darin bedeutet P den Mittelwert aus mehreren Einstellungen des Prüflings an der Mischschraube RG und N den Mittelwert der gleichen Einstellungen des Normalbeobachters [20].

Damit wird definiert [39]:

$$\begin{array}{ll} \text{Protanomalie} & AQ = 0,6 - 0,11 \\ \text{Deutanomalie} & AQ = 2,0 - 20 \end{array}$$

(Nach neuerer Praxis gilt für Protanomalie $AQ < 0,65$, für Deutanomalie $AQ > 1,5$.)

Die Quotientenberechnung ist mit einem speziellen Rechenschieber von I. BEYERLEIN einfach und schnell durchzuführen [141; 196].

Die Begriffe der Protanopie, Deutanopie, Protanomalie und Deutanomalie werden entsprechend diesen Definitionen verwendet.

3.22: Dreifarben-Meßgerät (DFM)

Will man nicht nur eine Abweichung von der Farbennormalsichtigkeit feststellen, sondern die Spektralwertfunktionen der verschiedenen farbenfehlsichtigen Personen ermitteln, bedarf es eines Gerätes, das nicht nur wie das Anomaloskop eine einzige Farbgleichung (nämlich die gegen das Na-Gelb), sondern für jede beliebige Wellenlänge einzustellen ermöglicht. Wegen der Dreidimensionalität der Farben erfordert das eine Apparatur, die mit drei Primärvalenzen arbeitet, also ein Dreifarben-Meßgerät.

Für die vorliegenden Untersuchungen hat zu diesem Zweck ein DFM nach GUILD-BECHSTEIN-RICHTER [7] gedient. Das Gerät ist dazu so umgebaut worden (Abb. 10), daß in den Strahlengang wechselweise ein Interferenzfilter (IF) 5×5 cm (Schott & Gen., Mainz) verschiedener Wellenlänge λ eingebracht werden konnte. Anstelle der sonst üblichen Halterung für die zu messende Farbprobe wurde ein Spiegel (S) so befestigt, daß das von der Lichtquelle L kommende Licht in den Beobachtungsstrahlengang gelenkt wird.

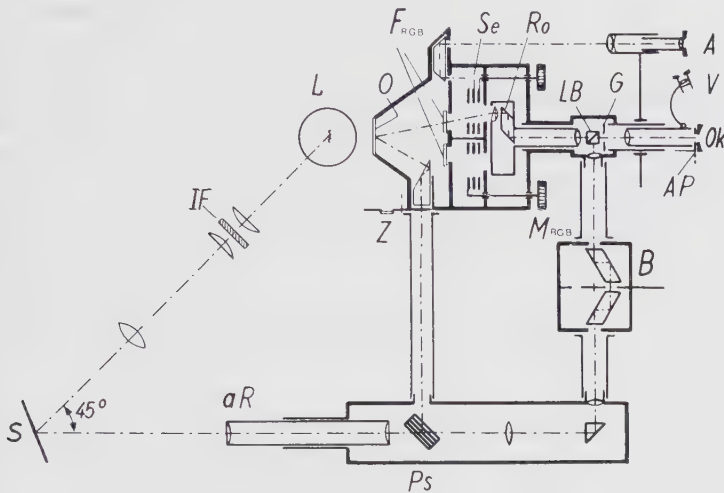


Abb. 10: Dreifarben-Meßgerät nach GUILD-BECHSTEIN-RICHTER
(mit den Abänderungen für die hier beschriebenen Versuche)

AP	Austrittspupille	O	Opalglasscheibe
A	Ablesefernrohr für die Farbwerte R, G, B	Ok	Okular
B	BRODHUN-Sektor	Ps	Plattensatz
F_{RGB}	Filter der Meßvalenzen	aR	auswechselbares Rohr
IF	Interferenz-Filter	Ro	rotierendes Prisma
G	Gesichtsfeldblende	S	Spiegel
L	Lichtquelle (Glühlampe)	Se	Sektorenblenden
LB	LUMMER-BRODHUN-Würfel	V	Vorschlaglupe
M_{RGB}	Mischschrauben R, G, B	Z	Zumischungs-Strahlengang

Schaut der Beobachter durch das Okular (Ok), tut sich für sein Auge ein $3,7^\circ$ großes Gesichtsfeld⁴ auf, das vertikal in zwei gleich große Hälften geteilt ist. In der rechten Gesichtsfeldhälfte erscheint bei dieser Anordnung die Farbvalenz $\mathfrak{F}$ des vom Interferenzfilter IF durchgelassenen Spektrallichtes der Wellenlänge λ als freie Farbe (siehe Abschn. 4.1, Punkt 3), während in der linken Hälfte die einzustellende Nachmischung dieser Farbvalenz aus den drei Primärvalenzen des Gerätes (Abb. 11 und 12) zu sehen ist.

⁴ Im Gerät hätte auch ein $1,5^\circ$ -Gesichtsfeld zur Verfügung gestanden; das ist jedoch wegen seiner Kleinheit für den Probanden außerordentlich anstrengend. Daher wurde (nach Absprache mit Prof. RICHTER) das $3,7^\circ$ -Gesichtsfeld gewählt, da die Gesichtsfeld-Leuchtdichten ausreichend hoch waren und Abweichungen wegen fehlender Macula-Pigmentierung erst oberhalb von 4° zu erwarten sind.

Diese Nachmischung im Dreifarben-Meßgerät, ebenso wie die zuvor erwähnte Rot-Grün-Mischung am Anomaloskop nach NAGEL, ist eine additive Farbmischung [29; 37; 47; 80; 221] im Gegensatz zu der von den Malern mit Pigmenten durchgeführten subtraktiven Farbmischungen und beruht auf Gesetzmäßigkeiten, die bereits im Jahre 1853 von GRASSMANN veröffentlicht, später von MAXWELL [116] und KÖNIG [80] experimentell bestätigt und in der Literatur als die GRASSMANNschen Gesetze bekannt sind (siehe 4.3).



Abb. 11: Gesichtsfeld des Dreifarben-Meßgerätes zur Messung der Farbvalenz der Strahlung $L_{e,\lambda}$ (lichtlose Umgebung)

Farbgleichungen der Primärvalenzen (Meßvalenzen) des DFM:

$$\begin{aligned} 100 \mathfrak{R} &= 10,79 \mathfrak{X} + 4,04 \mathfrak{Y} + 0 \quad \mathfrak{Z} \\ 100 \mathfrak{G} &= 5,063 \mathfrak{X} + 12,499 \mathfrak{Y} + 1,801 \mathfrak{Z} \\ 100 \mathfrak{B} &= 1,967 \mathfrak{X} + 0,338 \mathfrak{Y} + 9,697 \mathfrak{Z} \end{aligned}$$

Setzt man die Farbwerte aus dieser Gleichung in die Formel zur Berechnung der Farbörter im CIE-Koordinatensystem ein, ergibt sich:

	x	y	z
R:	0,727	0,273	0,000
G:	0,2615	0,6455	0,093
B:	0,1639	0,0282	0,8079

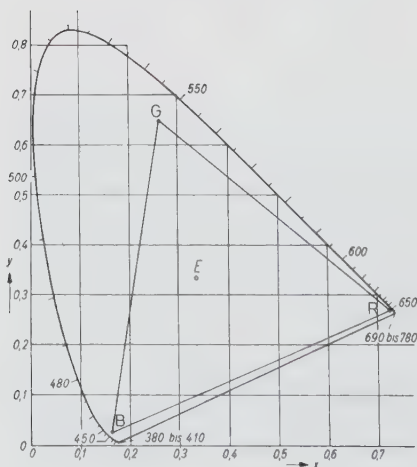


Abb. 12: Farbörter der Meßvalenzen des Dreifarben-Meßgerätes in der Normfarbtafel

4. Messung mit dem DFM und theoretische Grundlagen

4.1: Bedingungen für die Farbgleichheitseinstellung

Nach der Norm DIN 5033 Blatt 5 [20] gelten für die Durchführung des Gleichheitsverfahrens folgende Vorschriften, die hier für die Farbgleichheitseinstellung ebenso gelten:

1. Die Gesichtsfeldleuchtdichte muß mindestens 30 asb betragen, aber möglichst 100 asb nicht übersteigen, damit einerseits Helladaptation und andererseits blendungsfreies Sehen gewährleistet ist (Abb. 13).

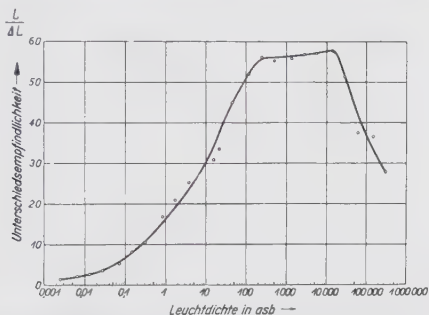


Abb. 13: Empfindlichkeit des Auges für Leuchtdichte-Unterschiede ΔL (nach den Messungen von KÖNIG und BRODHUN [80])

Diese Zahlenwerte beziehen sich auf einen Pupillendurchmesser r von 3 mm. Für die relative Beleuchtungsstärke E_{ret} auf der Netzhaut gilt:

$$E_{\text{ret}} [\text{Trol}] = L_{[\text{asb}]} \cdot r^2 [\text{mm}^2].$$

Tritt ein Lichtstrahl nicht durch die Pupillenmitte ein, so ist der Helligkeitseindruck geringer als der eines zentralen Strahls (STILES-CRAWFORD-Effekt). Die Helligkeitwirkung wird also bei größeren Pupillen-Öffnungen um den STILES-CRAWFORD-Faktor s schwächer, als durch die Pupillenerweiterung zu erwarten wäre [146] (Abb. 14).

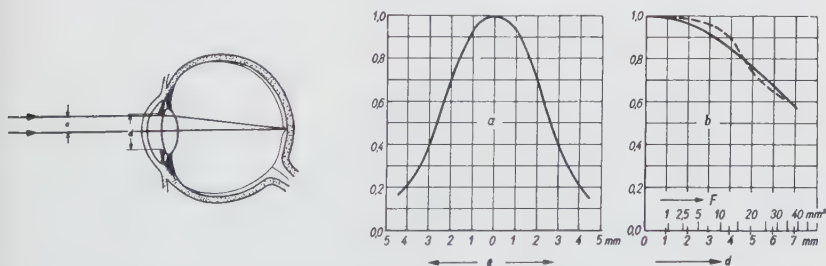


Abb. 14: STILES-CRAWFORD-Effekt

links: ein in der Entfernung e von der Augennase eintretender Lichtstrahl
rechts: scheinbare Verminderung der wirksamen Pupillen-Öffnung durch den STILES-CRAWFORD-Faktor s

2. Die Messungen sollen in einem unbunt gestrichenen Raum vorgenommen werden, dessen Wände eine Leuchtdichte von mindestens 50 asb haben.
3. Das Gesichtsfeld soll nicht größer als 1,50 sein, damit foveales Sehen gewährleistet ist (siehe Abschnitt 4.2).
4. Das Auge soll ausgeruht und neutral gestimmt sein. Bei Umstimmung ändert sich zwar die Farbempfindung, die durch den Farbreiz hervorgerufen ist, aber die einmal eingestellte Farbgleichung bleibt erhalten. Umstimmung hat keinen Einfluß auf die Farbgleichung der Farbvalenzen, sondern lediglich auf die Farbempfindung (Persistenzsatz nach v. KRIES [10; 73; 94; 138; 167; 188; 212; 234; 230]) (siehe Abschnitt 4.3).
5. Die Farbe soll als „freie“ Farbe im Gesichtsfeld erscheinen. Das ist der Fall, wenn das Gesichtsfeld gleichmäßig und strukturlos von der Farbe erfüllt erscheint und wird erreicht, wenn die zu beobachtende Fläche mit einer Linse in die Ebene der Augenpupille abgebildet wird (MAXWELLSche Beobachtung, Abb. 15).

Bei diesem Meßverfahren hat das Auge als Empfänger der Lichtstrahlung über Gleichheit oder Ungleichheit zweier dargebotener Farben zu entscheiden. Deshalb gehen in die Messungen dieser Methode die subjektiven Farbseigenschaften des Beobachters ein. Diese Tatsache wird in der vorgelegten Arbeit genutzt, um die Farbeigenschaften der Farbenfehlsichtigen zu untersuchen.

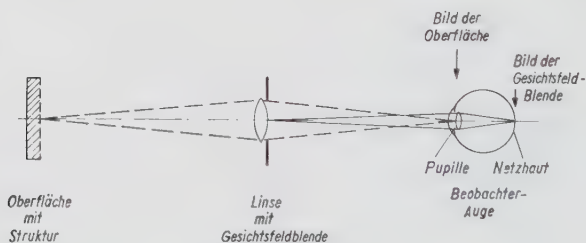


Abb. 15: Schema der MAXWELLSchen Beobachtung

4.2: Stäbchen und Zapfen in der Retina

1866 beschreibt MAX SCHULZE erstmalig sehr eingehend die Unterschiede im Bau von Stäbchen und Zapfen [42]. In der menschlichen Retina befinden sich etwa 130 Millionen Rezeptoren [22], von denen 110 bis 125 Millionen Stäbchen und 4 bis 7 Millionen Zapfen sind [99; 132; 134], aber nur ungefähr 1 Million Nervenfasern leiten die Information im *Nervus opticus* weiter [99]. Die Nervenfasern des *Nervus opticus* sind Axone der Ganglienzellen der Retina aus der 5. Schicht. Diese Ganglienzellen sind mit den Rezeptoren durch ein Geflecht, bestehend aus bipolaren, horizontalen und amakrinen Zellen, verbunden [23; 24; 25]. Die verschiedenen

Zelltypen dieses Nervennetzes wirken hemmend und erregend aufeinander [222]. Auf Grund des sowohl morphologisch als auch funktionell unterschiedlichen Aufbaus der Retina befinden sich in der Netzhautmitte, der *Fovea centralis* [152; 153], innerhalb eines Bezirks von 0,2 mm Durchmesser entsprechend einem Gesichtsfeld von $1,5^\circ$ ausschließlich Zapfen, von denen jeder einzelne einen Durchmesser von $1,9 \mu\text{m}$ hat [126]. Die Verschaltung soll hier vorwiegend monosynaptisch sein, während peripherwärts die Projektion polysynaptisch wird und die Stäbchen an Zahl zunehmen. Nur ein Zapfen wird in dem Randareal auf etwa 26 Stäbchen gezählt [126]. Den Stäbchen wird Empfindlichkeit für schwache Lichtreize — Nachtsehen — und den Zapfen Tages- und Farbsehen zugeschrieben. Wie seit YOUNG und HELMHOLTZ vermutet, gibt es tatsächlich nach den Untersuchungen von BROWN, DOBELLE, MARKS und MACNICHOL [21] sowie WALD [215] drei verschiedene Zapfenarten, die für das Farbsehen verantwortlich sind. Ihre Absorptionsmaxima liegen etwa bei 440—450 nm, 530—540 nm, 560—570 nm.

Damit möglichst nur die Zapfen gereizt werden, sollen für die Untersuchungen die photopischen Bedingungen eingehalten werden, für die die Tageswertkurve $V(\lambda)$ der spektralen Hellempfindlichkeit des Auges gilt [22].

4.3: Der Begriff der Farbvalenz und die Gesetze der additiven Farbmischung

Eine trichromatische Gesetzmäßigkeit ist in der Farbmetrik schon lange bekannt. Die Grundlagen bilden die Gesetze von GRASSMANN und der Begriff der Farbvalenz von M. RICHTER. Heute würden wir die GRASSMANNschen Gesetze folgendermaßen formulieren:

1. Vier Farbvalenzen $\mathfrak{F}$, $\mathfrak{R}$, $\mathfrak{G}$, $\mathfrak{B}$ sind linear abhängig und stellen sich in einer linearen Vektorgleichung dar: $F\mathfrak{F} = R\mathfrak{R} + G\mathfrak{G} + B\mathfrak{B}$, in der die skalaren Größen (die Farbwerte) F , R , G , B nicht alle Null sind.
2. Wenn $\mathfrak{F} = \mathfrak{F}_1$ und $\mathfrak{F} = \mathfrak{F}_2$, so ist $\mathfrak{F}_1 = \mathfrak{F}_2$ auch dann, wenn die Farbreizfunktionen $q_{\lambda 1}$ und $q_{\lambda 2}$, die zu $\mathfrak{F}_1$ und $\mathfrak{F}_2$ gehören, unterschiedlich sind. Nur die Farbvalenz ist für die additive Farbmischung maßgebend, nicht der Farbreiz, der durch die Farbreizfunktion beschrieben wird.

M. RICHTER hat 1948 aus den GRASSMANNschen Gesetzen das „farbmetrische Grundgesetz“ formuliert [142; 143; 148]:

„Der helladaptierte Zapfenapparat des trichromatischen Auges bewertet die einfallende Strahlung nach drei voneinander unabhängigen, spektral verschiedenen Wirkungsfunktionen linear und stetig, wobei sich die Einzelwirkungen additiv linear zu einer einheitlichen, untrennbaren Gesamtwirkung zusammensetzen, die Farbvalenz genannt wird.“

Die zu einer Farbreizfunktion $q(\lambda)$ gehörige Farbvalenz entsteht durch Bewertung dieser Funktion mit drei spektralen Wirkungsfunktionen, die

aus dem Verhalten des Auges beim Farbsehen abgeleitet sind und als Spektralwertfunktionen [29-33; 77; 81; 85; 109; 115; 125; 149; 178; 207] bezeichnet werden.

Aus der Dreiheit der Spektralwertfunktionen folgt, daß zur eindeutigen Kennzeichnung einer Farbvalenz jeweils drei voneinander unabhängige Maßzahlen, die Farbwerte, genügen. Die Bestimmung dieser Maßzahlen wird Farbmessung genannt und folgt aus den Gesetzen der additiven Farbmischung. Als Meßvalenzen dienen die jeweiligen Primärvalenzen. Die Primärvalenzen bestimmen das System, in dem gemessen wird. In einem System mit anderen Meßvalenzen wird die Farbvalenz dementsprechend durch ein anderes Farbwerttripel festgelegt. Transformationen von einem in ein anderes System sind möglich. Die Meßvalenzen können dabei beliebig gewählt werden, solange nicht eine durch Mischung der anderen beiden erzeugt werden kann (Abb. 12).

Die GRASSMANNschen Gesetze sind wiederholt getestet worden [47, 80, 99, 230, 234]. Man fand, daß sie nur unter gewissen Bedingungen streng gelten. So kann die erzeugte Farbgleichheit zwischen einer vorgegebenen Farbvalenz und der additiven Mischung der Primärvalenzen zusammenbrechen, wenn das Gesichtsfeld extrem groß oder extrem klein und/oder die Leuchtdichte zu gering oder zu hoch ist. Kurz, außerhalb fovealen Sehens, bei Dämmerlicht oder bei blendendem Licht gehorcht der Sehapparat nicht mehr den einfachen GRASSMANNschen Gesetzen.

Die geforderten Bedingungen (siehe auch Meßbedingungen im Abschnitt 4.1) aber erlauben es dem Beobachter, eine vorgegebene Farbvalenz $\mathfrak{F}$ durch Gleichheitseinstellung, hier monokular gemessen, dadurch zu bestimmen, daß er eine additive Mischung aus den drei Primärvalenzen $\mathfrak{R}$, $\mathfrak{G}$, $\mathfrak{B}$ herstellt, die nach seinem Urteil ununterscheidbar von $\mathfrak{F}$ ist, d. h. die Farbe des rechten Feldes muß der des linken Feldes in Farbton, Helligkeit und Sättigung gleich sein.

Als Maßzahlen für jede Gleichheitseinstellung gelten die den Stellungen der Meßblenden entsprechenden Farbwerte, die an den zugeordneten Skalen abzulesen sind. So weist bei unseren Untersuchungen der jeweilige Beobachter jedem der 29 Spektrallichter bestimmter Strahldichte S_i im Wellenlängenbereich von 403 nm—709 nm bestimmte Farbwerte zu. Jede Einstellung ist in Form einer linearen vektoriellen Farbgleichung darstellbar:

$$\mathfrak{S}_n = R_n \mathfrak{R} + G_n \mathfrak{G} + B_n \mathfrak{B} \quad n = 1 \dots 29$$

Insgesamt bekommen wir also je Meßreihe 29 verschiedene Farbgleichungen, d. h. jede Versuchsperson (Vp) stellt 29 Gleichungen ein, von denen je nach Schwankung die einzelne Gleichung drei- bis fünfmal bestimmt wird. Aus den auf diese Weise erhaltenen drei bis fünf Farbwertsätzen wird das arithmetische Mittel gebildet, bevor diese Meßdaten, aufgeteilt in einzelne Gruppen, dem Computer zugeführt werden, der für jede Gruppe das arithmetische Mittel, die Standardabweichung der einzelnen Beobachtung und die Standardabweichung des Mittelwertes errechnet.

4.4: Innere und äußere Farbmischung [149a]

Bei den Meßreihen mit dem DFM mußte mit einem Zumischungsstrahlengang gearbeitet werden, da die geometrischen Örter der Primärvalenzen $\mathfrak{R}_{\text{DFM}}$, $\mathfrak{G}_{\text{DFM}}$, $\mathfrak{B}_{\text{DFM}}$ des DFM als reelle Farben innerhalb des Spektralfarbenzugs liegen (Abb. 12). Man sagt „äußere Nachmischung“ dazu, und diese liegt dann vor, wenn eine oder auch zwei der Meßvalenzen der nachzumischenden Farbe zugemischt werden müssen (Abb. 17), bis Gleichheit durch Mischung der beiden anderen Meßvalenzen (bzw. mit der dritten) erreicht ist. Die zugemischten Beträge erscheinen in der Farbgleichung auf der linken Seite bzw. mit negativen Vorzeichen auf der rechten Seite; siehe die vektorielle Darstellung in den Abb. 16-19.

Das Mischungsergebnis wird durch den Summenvektor dargestellt (Parallelogrammregel). Neben der beschriebenen äußeren Nachmischung gibt es die innere Nachmischung. Hierbei liegt der Summenvektor stets im Innern der von den Meßvalenzen (Komponenten) aufgespannten Raumecke.

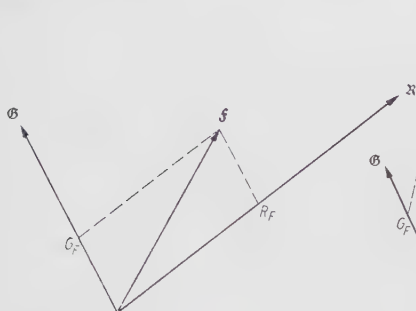


Abb. 16: Vektor-Darstellung der inneren Farbmischung mit zwei Komponenten (nach [149a])

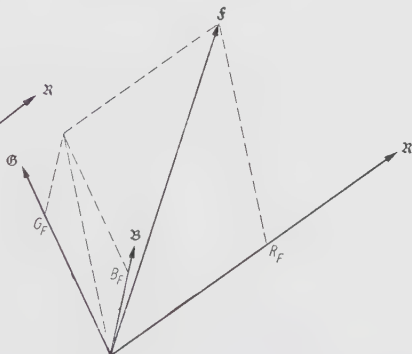


Abb. 17: Vektor-Darstellung der inneren Farbmischung mit drei Komponenten (die Vektoren $\mathfrak{B}$ und $\mathfrak{S}$ liegen nicht in der Zeichenebene!) (nach [149a])

Bei den hier durchgeführten Messungen war fast stets eine äußere Nachmischung erforderlich. Dementsprechend sind dann einer oder zwei der Farbwerte R , G , B negativ. Bei den durch die Interferenzfilter erzeugten Test-Wellenlängen von 403 bis 455 nm wurde grüne Meßvalenz zugemischt, im Gebiet von 455 bis 519 nm rote und im Bereich 544 bis 643 nm blaue Meßvalenz.

4.5: Reduktion der Meßwerte auf gleiche Strahldichte

Um alle gewonnenen Einzelmessungen miteinander vergleichen zu können, müssen die erhaltenen Farbwerte R_n , G_n , B_n auf ein energiegleiches Spektrum umgerechnet werden. Grund hierfür sind die von den

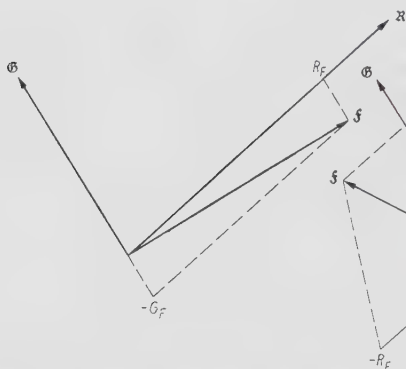


Abb. 18: Vektor-Darstellung der äußeren Farbmischung mit zwei Komponenten (nach [149a])

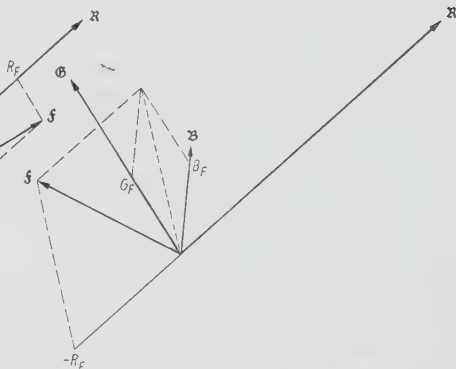


Abb. 19: Vektor-Darstellung der äußeren Farbmischung mit drei Komponenten (die Vektoren $\mathfrak{B}$ und $\mathfrak{F}$ liegen nicht in der Zeichenebene!) (nach [149a])

Interferenzfiltern unterschiedlich durchgelassenen Strahldichten. Auf diese Weise werden dem Beobachter die verschiedenen Spektrallichter mit mehr oder weniger großer Leuchtdichte dargeboten. Die relativen Strahldichten sind mit einem Photoelement gemessen worden, das in den Strahlengang zwischen S und aR (siehe Abb. 10) gestellt wurde. Gemessen wurde für jedes der Interferenz-Filter der Photostrom i_λ , der an in Kurzschlußschaltung angeschlossene Galvanometer abgegeben wird. Da das Photoelement die Strahlung nicht aselektiv bewertet, muß seine relative spektrale Empfindlichkeitskurve $s(\lambda)$ bekannt sein [149]. Diese bestimmt man am Doppelmonochromator mit Quarzprismen durch Vergleich mit einem Vakuumthermoelement, dessen spektrale Empfindlichkeit bekannt ist.

Die beim Versuch wirksame relative Strahldichte S_λ berechnet sich also zu

$$S_\lambda = i_\lambda s(\lambda)$$

und damit werden die gesuchten Spektralwerte

$$\bar{r}(\lambda) = R(\lambda)/S_\lambda$$

$$\bar{g}(\lambda) = G(\lambda)/S_\lambda$$

$$\bar{b}(\lambda) = B(\lambda)/S_\lambda$$

$\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ sind die auf das Primärvalenztripel $\mathfrak{R}$, $\mathfrak{G}$, $\mathfrak{B}$ bezogenen Farbwerte für das energiegleiche Spektrum, die, über der Wellenlänge aufgetragen, die Spektralwertkurven ergeben. Der gemessene Photostrom i_λ , die spektrale Empfindlichkeit $s(\lambda)$ und die daraus errechnete relative Strahldichte S_λ sind für jede entsprechende Wellenlänge λ in Tab. 5 wiedergegeben.

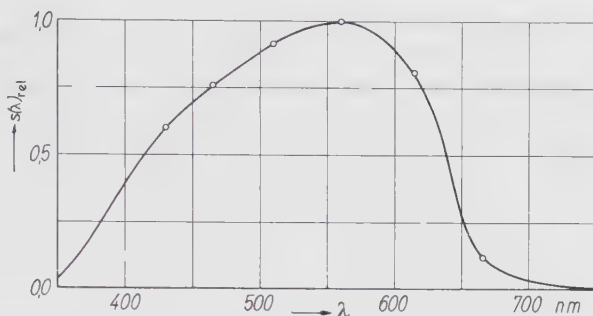


Abb. 20: Relative spektrale Empfindlichkeit $s(\lambda)$ des zur Kalibrierung benutzten Photoelements

Tab. 5: Relative wirksame Strahldichten S_λ bei den Messungen mit den 29 Interferenz-Filtern

Filter Nr.	λ	i_λ^*	$s(\lambda)$	S_λ
1	403	8,4	4,2	2
2	416	7,2	8,0	0,9
3	429	9,4	16,0	0,588
4	443	14,0	26,0	0,538
5	455	19,0	40,0	0,475
6	465	16,3	51,0	0,314
7	477	37,3	62,5	0,596
8	486	34,0	70,0	0,486
9	494	23,5	75,0	0,313
10	500	44,0	78,7	0,56
11	510	39,0	83,2	0,469
12	519	53,0	87,5	0,606
13	529	69,0	90,6	0,76
14	544	54,0	95,0	0,569
15	553	52,0	97,0	0,536
16	561	36,5	98,6	0,37
17	564	66,0	99,0	0,606
18	580	63,3	100,0	0,633
19	591	55,0	98,6	0,56
20	603	93,0	95,7	0,963
21	614	91,0	91,0	1,0
22	623	33,0	86,0	0,384
23	631	75,0	79,0	0,95
24	643	57,0	69,0	0,826
25	654	49,0	57,0	0,86
26	664	24,0	44,0	0,545
27	678	27,3	31,0	0,87
28	689	18,0	20,0	0,9
29	709	21,5	12,0	1,79

* Mittel aus je 5 Meßwerten

4.6: Normvalenzsystem

1931 beschloß die CIE, auf der Grundlage der von GUILD und WRIGHT ermittelten Spektralwertkurven (Abb. 21), die jener durch Messungen an 7, dieser an 10 farbennormalsichtigen Personen gefunden hatte, ein Normvalenzsystem zu definieren.

Diese Spektralwertkurven wurden unter Verwendung der reellen monochromatischen Primärvalenzen

Rot (**R**) : $\lambda = 700,0 \text{ m}$

Grün (**G**) : $\lambda = 546,1 \text{ m}$

Blau (**B**) : $\lambda = 455,8 \text{ m}$

bestimmt. Im Spektralgebiet, in dem für die Nachmischung eines Spektrallichtes (λ) eine äußere Nachmischung notwendig war, tritt ein negativer Kurvenverlauf auf. Da negative Farbwerte bei der praktischen Handhabung zu Fehlern Anlaß geben können, aber bei Messungen mit reellen Meßvalenzen immer in Teilen des Spektralgebietes äußere Mischungen (siehe Abschnitt 4.4) vorgenommen werden müssen, hat man virtuelle Primärvalenzen **x**, **y**, **z** eingeführt. Da diese „Normvalenzen“ im weiten Gebiet der virtuellen Farbvalenzen frei wählbar sind, konnte man ihnen noch weitere Eigenschaften verleihen. Das von den Normvalenzen aufgespannte Dreieck sollte natürlich den Spektralfarbenzug möglichst eng umschließen. Weiterhin hat man, um eine möglichst einfache Berechnung des Hellbezugswertes aus den Farbwerten, hier Normfarbwerte genannt, zu ermöglichen, festgelegt, daß die Leuchtdichtebeiwerte für die zwei Normalvalenzen **x** und **z** Null werden, daß also $L_x = L_z = 0$ und $L_y = 1$ und damit $A = Y$. Man erreicht dies, indem man **x** und **z** in die Alychnen-Ebenen legt. Daher liegen die Punkte X und Z in der Farbtafel in der Schnittlinie der Alychne mit der Farbtafelebene; es verlaufen somit die Isolychnen parallel zu XZ. Schließlich hat man noch die Einheiten so gewählt, daß der Farbort des äquienegetischen Spektrums Mittelpunktswalenz ist: $x = y = z = 0$ [107; 232; 233].

Auf Grund dieser Festsetzungen ergibt sich für die genannten **R**, **G**, **B**-Primärvalenzen (= reelle Primärvalenzen, gleiche Mittelpunktswalenz) folgende Matrix:

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= +2,36460 \mathbf{R} - 0,51515 \mathbf{G} + 0,00520 \mathbf{B} \\ \mathbf{y} &= -0,89653 \mathbf{R} + 1,42640 \mathbf{G} - 0,01441 \mathbf{B} \\ \mathbf{z} &= -0,46807 \mathbf{R} - 0,08875 \mathbf{G} + 1,00921 \mathbf{B} \end{aligned}$$

Durch lineare Transformation der Spektralwertkurven aus Abb. 21 erhält man unter Benutzung dieser Gleichungen die in Abb. 22 dargestellten Normspektralwertfunktionen.

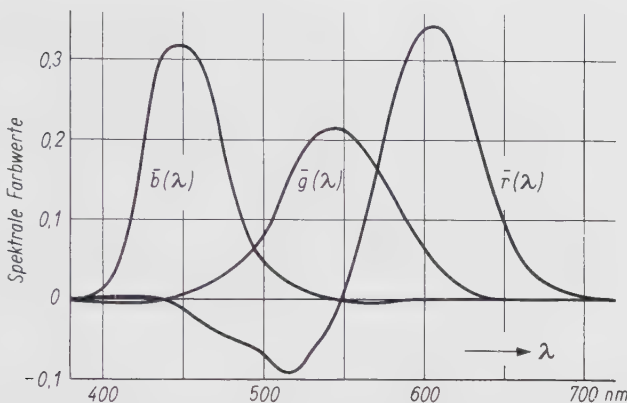


Abb. 21: Spektralwertkurven der CIE, bezogen auf die reellen Primärvalenzen
 $\mathfrak{R} = 700 \text{ nm}$, $\mathfrak{G} = 546,1 \text{ nm}$, $\mathfrak{B} = 435,8 \text{ nm}$

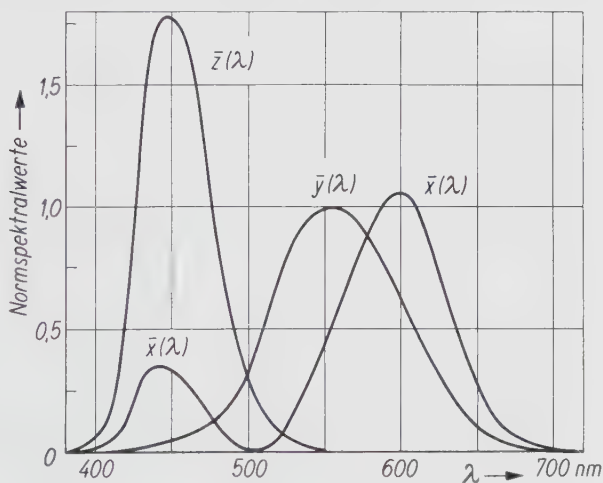


Abb. 22: Normspektralwertkurven nach
 DIN 5033 (CIE 1931)

5. Durchführung der Versuche

5.1: Ziel der Untersuchung

Für die Differenzierung der Farbenfehlsichtigkeiten sollte es grundsätzlich erwünscht sein, eine möglichst vollständige Auskunft über die spektrale Empfindlichkeit der Augen zu bekommen, also die Spektralwertkurven zu kennen.

Heute wird in Deutschland in der Regel eine differenzierte Diagnose der Farbenfehlsichtigkeit mit dem NAGELschen Anomaloskop (siehe Abschn. 3.2.1) gestellt. Dieses Gerät kann infolge seiner Meßanordnung

dem Farbensehmechanismus nicht in der Weise gerecht werden, wie es ein Spektralfarbenmischapparat kann, der die gesamte spektrale Empfindlichkeit des Auges bestimmt. Ein Spektralfarbenmischapparat gilt jedoch als sehr aufwendig. Insbesondere ist ein solches Gerät sehr teuer und unhandlich, weil die jeweiligen Spektralfarben über einzelne Prismen erzeugt werden.

Wir wollten die Spektralwertkurven einer größeren Anzahl von anomalen Trichromaten und Dichromaten aufnehmen. Dazu diente anstelle eines Spektralfarbenmischapparates ein DFM vom Typ GUILD-BECHSTEIN-RICHTER (siehe Abschn. 3.2.2). Die Spektrallichter, deren Farbgleichungen aufgenommen wurden, erzeugten wir hierbei (erstmalig für diesen Zweck) durch einen Satz von Interferenzfiltern, deren wirksame Wellenlängen mit den in Tab. 6 angegebenen Wellenlängen übereinstimmen.

5.2: Auswahl der Versuchspersonen

Ein Teil der Versuchspersonen ist auf der Internationalen Industrieausstellung Berlin 1970 gewonnen worden. Der Ausstellungsstand der BAM, Fachgruppe Farbmeterik, bot Besuchern die Möglichkeit zur Prüfung ihres Farbensehens. Ein durch Tageslicht erhellter Schaukasten mit zwei ISHIHARA-Tafeln, einer FARNSWORTH-Tafel und den üblichen Erläuterungen diente zur groben Vorauswahl. Personen, die für Farbenfehlsichtigkeit typische Verwechselungen zeigten, wurden mit dem Anomaloskop geprüft und dabei für unsere Untersuchung gewonnen.

Ein anderer Teil wurde aus den Unterlagen für Schulentlassungsuntersuchungen, die eine Rubrik für Farbenfehlsichtigkeit vorgesehen haben, ermittelt und um eine Nachuntersuchung gebeten.

Für ihre Hilfe und Unterstützung sei den Schulärzten der Bezirke Tempelhof, Charlottenburg, Steglitz und Neukölln sowie allen Versuchspersonen für Mühe und Ausdauer gedankt.

5.3: Durchführung der Messungen

Die Probanden wurden an zuvor vereinbarten Terminen in das Labor der *Fachgruppe Farbmeterik der Bundesanstalt für Materialprüfung* bestellt.

Nach einem kurzen Einführungsgespräch verschaffte man sich durch Prüfung mit den Farbtafeln (siehe Abschn. 3.1) ein Urteil, ob eine Farbenfehlsichtigkeit vorliegt.

In der Regel war eine solche vorhanden, und das ist auch nicht verwunderlich, da alle Personen aufgrund von Vorprüfungen zu uns kamen. So konnte man schnell zum Anomaloskop übergehen, um mit dessen Hilfe die Diagnose einer Deuteranomalie, Deuteranopie, Protanomalie oder Protanopie zu stellen. 3—5 Anomaloskopeinstellungen wurden dem Beobachter angeboten, nachdem man ausgetestet hatte, welche Art von Farbenfehlsichtigkeit vorlag.

Dann konnte man an das DFM mit den vorgesehenen Spektrallichtern gehen. Den Versuchspersonen wurde gesagt, es käme auf exakte Gleichheit des linken und rechten Halbfeldes im dunklen Umfeld an. Die Personen stellten jede Einstellung drei- bis fünfmal ohne Hilfe des Versuchsleiters ein. Den Protanopen wurde gesagt, daß sie wahrscheinlich nur die Primärvalenzen Grün und Blau benötigen würden. Sobald ein am Anomaloskop als Protanop oder Subprotanop bestimmter Farbenfehlsichtiger für die exakte Einstellung am DFM alle drei Primärvalenzen benötigte, galt er als anomaler Trichromat (Protanomaler). Weiter ist zu sagen, daß es Deutanopen, zumindest dreien (mit den anderen ist es nicht versucht worden), gleichgültig war, ob sie die Einstellungen mit den Primärvalenzen Rot und Blau oder Grün und Blau machten. Anomale Trichromaten benötigten immer drei Primärvalenzen.

Zur Kontrolle wurde eine Anzahl Farbenormalsichtiger ebenfalls dieser Untersuchung unterworfen und für sie ein mittlerer Satz von Spektralwertkurven in der gleichen Weise wie für die Farbenfehlsichtigen errechnet.

5.4: Gang der Auswertung

Die Einstellungen wurden je nach Abweichen voneinander jeweils 3—5 mal wiederholt und daraus sofort ein Mittelwert gebildet. Aus allen Versuchsreihen einer Gruppe (z. B. der Deutanomalen) wurden für jede der gemessenen Wellenlängen die Mittelwerte, die Standardabweichung und die Standardabweichung des Mittelwertes durch den Computer errechnet.

Es wird das arithmetische Mittel aus den beobachteten Farbwerten einer bestimmten Wellenlänge nach der Formel

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{n} S(x) \quad (1)$$

ausgedrückt. Als Maß für die Genauigkeit von $\bar{x}$, also als Maß für die Abweichungen der einzelnen Beobachtungen vom Mittel $\bar{x}$, wird die Standardabweichung nach folgender Formel ausgegeben:

$$s = \pm \sqrt{\frac{S[(x - \bar{x})^2]}{n - 1}} = \pm \sqrt{\frac{S(x^2) - \bar{x}S(x)}{n - 1}} \quad (2)$$

Umformung nach $(x - \bar{x})^2 = x^2 - x\bar{x} + \bar{x}^2$

Da der Mittelwert $\bar{x}$ sich gemäß

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot x_1 + \frac{1}{n} \cdot x_2 + \dots + \frac{1}{n} \cdot x_n \quad (3)$$

als Summe von Größen, von denen jede eine Standardabweichung s besitzt, auffassen läßt, ergibt sich nach der Formel (2) für den Mittelwert eine Standardabweichung

$$s_{\bar{x}} = \sqrt{\left(\frac{1}{n}\right)^2 s^2 + \left(\frac{1}{n}\right)^2 s^2 + \dots + \left(\frac{1}{n}\right)^2 s^2} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

Aus der Standardabweichung des Mittelwertes geht hervor, wie die Genauigkeit einer Mittelwertangabe mit zunehmendem Versuchsumfang n wächst, allerdings nur proportional $\frac{1}{\sqrt{n}}$, d. h. um die Genauigkeit einer Mittelwertangabe zu verdoppeln, muß der Versuchsumfang vervierfacht werden usw.

Die Standardabweichung des Mittelwertes gibt für eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,050 (5%) eine Vertrauensgrenze von 95% für die positive bzw. negative Schwankung des wahren Wertes um den Mittelwert an (150, S. 49).

Die Mittelwerte z. B. von den 31 Versuchsreihen der Deuteranomalien ergeben Werte, die wir als typisch für Deuteranomalie ansehen wollen. Es ist also, da mit den Meßdaten der anderen Farbenfehlsichtigen gleichermaßen verfahren wurde, ein „Durchschnittsbeobachter“ für jede der vier Farbenfehlsichtigkeiten gebildet worden. Die R , G , B -Werte jedes Durchschnittsbeobachters wurden mit den X , Y , Z -Werten des CIE-Normalbeobachters nach der Methode der kleinsten Quadrate verglichen.

Die Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate geht auf GAUSS [238] zurück. Man stellt die Forderung auf:

$$Q = \sum v_i^2 = v' \quad v = \text{Min}$$

An Stelle des Gleichungssystems:

$$Ax = y$$

operiert man mit den Fehlergleichungen:

$$Ax - y = v$$

ausführlich:

$$a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n - y_1 = v_1$$

$$a_{21}x_1 + \dots + a_{2n}x_n - y_2 = v_2$$

$$a_{m1}x_1 + \dots + a_{mn}x_n - y_m = v_m$$

Ziel der Ausgleichsrechnung ist es, die durch die Experimente bestimmten Kurven ein wenig auszugleichen. Die von der CIE definierten Normspektralwertkurven werden als Maßstab genommen. Mit der Methode der kleinsten Quadrate werden die Abstände an den Meßpunkten von den Normspektralwertkurven zu den experimentell bestimmten Kurven als Summe ins Quadrat erhoben. Diese Berechnung wird vom Rechner so oft durchgeführt, bis die Summe der Abstände zum Quadrat ein Minimum ist. Gleichzeitig dient die Durchführung dieser Rechnung zur Normierung.

Es soll gelten:

$$\mathfrak{F} = \bar{r}(\lambda) \mathfrak{R} + \bar{g}(\lambda) \mathfrak{G} + \bar{b}(\lambda) \mathfrak{B}$$

$$x(\lambda) = a_{11} \bar{r}(\lambda) + a_{12} \bar{g}(\lambda) + a_{13} \bar{b}(\lambda)$$

$$y(\lambda) = a_{21} \bar{r}(\lambda) + a_{22} \bar{g}(\lambda) + a_{23} \bar{b}(\lambda)$$

$$z(\lambda) = a_{31} \bar{r}(\lambda) + a_{32} \bar{g}(\lambda) + a_{33} \bar{b}(\lambda)$$

$$x(\lambda) - a_{11} \bar{r}(\lambda) + a_{12} \bar{g}(\lambda) + a_{13} \bar{b}(\lambda) = v_1(\lambda)$$

$$y(\lambda) - a_{21} \bar{r}(\lambda) + a_{22} \bar{g}(\lambda) + a_{23} \bar{b}(\lambda) = v_2(\lambda)$$

$$z(\lambda) - a_{31} \bar{r}(\lambda) + a_{32} \bar{g}(\lambda) + a_{33} \bar{b}(\lambda) = v_3(\lambda)$$

Die Faktoren, die für Minimalisierung sorgen, sind unter Abschn. 6.2 abgedruckt. Die Kurven, für die der Minimumabstand gilt, wurden vom Plotter getrennt nach R , G , B aufgezeichnet. Die Ausgleichsrechnung wurde mit dem Computer des Großrechenzentrums durchgeführt.

C. Ergebnisse

6. Beschreibung der Ergebnisse

6.1: Ergebnisse am DFM

Die unmittelbaren Meßergebnisse fielen in Form von Tabellen an, in denen für jede Meßreihe (je Vp. 1 bis 4 Reihen) die Mittelwerte der Einstellungen am DFM für die 29 Test-Wellenlängen (Tab. 5), also die Werte $R(\lambda)$, $G(\lambda)$, $B(\lambda)$ aufgeschrieben waren. Ein Beispiel für eine solche Tabelle ist in Tab. 6 gegeben. Sie enthält außer der Wellenlänge (die hier des besseren Verständnisses wegen beigelegt ist) eine Kennziffer, die die Vp. und die Wellenlänge für den Computer kennzeichnet, und die Mittelwerte der Einstellungen der Vp.

Die Ergebnisse aller Vpn. sind in dieser Form dem Computer eingegeben worden⁵. Wie in Abschn. 5.4 dargelegt, sind daraus die Mittelwerte für die einzelnen Gruppen („Durchschnittsbeobachter“) berechnet worden; gleichzeitig wurden auch die Standardabweichungen ermittelt.

Folgende Gruppen wurden gebildet:

- a) Normale (4 Vpn., 6 Meßreihen)
- b) Protanopen (6 Vpn., 10 Meßreihen)
- c₁) Deutanopen, die mit den Primärvalenzen G und B eingestellt haben (6 Vpn., 8 Meßreihen)
- c₂) Deutanopen, die mit den Primärvalenzen R und B eingestellt haben (3 Vpn., 3 Meßreihen)
- d) Protanomale (8 Vpn., 13 Meßreihen, AQ von 0,1 bis 0,46)
- e) Deuteranomale (19 Vpn., 31 Meßreihen, AQ von 3,1 bis 4,2)

6.2: Ergebnisse der Ausgleichsrechnung

Es wurden die Mittelwerte, die aus dem Statistikprogramm erhalten wurden, als Daten für das Ausgleichsprogramm eingegeben. Die Ergebnisse sind vom Computer sowohl digital ausgedruckt als auch über den Plotter gezeichnet worden. Tab. 7 gibt ein Beispiel für die ausgedruckten Tabellen; die aufgezeichneten Kurven sind in den Abb. 23-36 für die einzelnen Durchschnittsbeobachter (der Übersichtlichkeit wegen getrennt für jede Spektralwertfunktion) so wiedergegeben, wie sie der Plotter aufge-

⁵ Interessenten können Photokopien der Meß- und Auswertedaten und Rechenprogramme durch die Universitäts-Augenklinik der FU, Klinikum Berlin-Steglitz, zur Verfügung gestellt werden.

Tab. 6: Beispiel einer Meßreihe

Spalte 1: Wellenlänge

Spalte 2: Kennziffer (Versuchsperson + Wellenlängen-Kennziffer)

Spalte 3: $\bar{r}(\lambda)$ Spalte 4: $\bar{g}(\lambda)$ Spalte 5: $\bar{b}(\lambda)$

1	2	3	4	5
403	510101	.1	— 0.6	2.8
416	510102	.2	— 0.9	10.5
429	510103	.7	— 0.8	16.7
443	510104	1.0	— 2.0	22.5
455	510105	0.0	— 0.1	37.2
465	510106	— 1.1	.3	35.0
477	510107	— 2.5	3.5	42.5
486	510108	— 3.2	5.0	29.5
494	510109	— 3.0	4.5	10.5
500	510110	—10.5	12.0	11.5
510	510111	—12.0	16.5	5.0
519	510112	—16.0	30.1	1.9
529	510113	—14.5	53.0	— 6.5
544	510114	— 0.1	41.5	— 8.5
553	510115	7.0	35.0	—11.0
561	510116	9.0	25.0	— 8.0
564	510117	21.8	39.0	— 9.0
580	510118	66.0	36.0	— 9.0
591	510119	58.6	18.0	— 4.7
603	510120	110.0	17.0	— 7.0
614	510121	161.0	1.0	— 3.0
623	510122	44.0	1.7	— 0.8
631	510123	71.0	3.1	— 1.8
643	510124	39.5	1.0	— 2.5
654	510125	26.0	0.0	— 4.6
664	510126	8.0		0.0
678	510127	5.0		
689	510128	2.0		
709	510129	0.0		

zeichnet hat. Die Meßwerte sind dabei durch einen Punkt, die zum Vergleich mitgezeichneten Normspektralwertfunktionen (CIE 1931) als gestrichelte Linie gekennzeichnet.

Durch die Ausgleichsrechnung wurden zunächst die folgenden Transformations-Matrizen erhalten. Mit diesen wurden dann die in den Abbildungen gezeigten Kurvenwerte errechnet.

a) für die Gruppe der farbennormalsichtigen Beobachter (N)

$$\bar{x}(\lambda)_N = 0,00885 \bar{r}(\lambda) + 0,00555 \bar{g}(\lambda) + 0,00312 \bar{b}(\lambda)$$

$$\bar{y}(\lambda)_N = 0,00313 \bar{r}(\lambda) + 0,0132 \bar{g}(\lambda) + 0,00098 \bar{b}(\lambda)$$

$$\bar{z}(\lambda)_N = 0,00153 \bar{r}(\lambda) + 0,003 \bar{g}(\lambda) + 0,0185 \bar{b}(\lambda)$$

Transponieren [238] ergibt:

$$100 \mathfrak{R} = 8,85 \mathfrak{X} + 3,13 \mathfrak{Y} + 1,53 \mathfrak{Z}$$

$$100 \mathfrak{G} = 5,55 \mathfrak{X} + 13,2 \mathfrak{Y} + 3,0 \mathfrak{Z}$$

$$100 \mathfrak{B} = 3,12 \mathfrak{X} + 0,98 \mathfrak{Y} + 18,5 \mathfrak{Z}$$

b) für die Gruppe der protanopen Beobachter (PAP)

$$\bar{x}(\lambda)_{\text{PAP}} = 0 \quad \bar{r}(\lambda) + 0 \quad \bar{g}(\lambda) + 0 \quad \bar{b}(\lambda)$$

$$\bar{y}(\lambda)_{\text{PAP}} = 0 \quad \bar{r}(\lambda) + 0,0218 \quad \bar{g}(\lambda) + 0,000415 \quad \bar{b}(\lambda)$$

$$\bar{z}(\lambda)_{\text{PAP}} = 0 \quad \bar{r}(\lambda) + 0,0045 \quad \bar{g}(\lambda) + 0,0202 \quad \bar{b}(\lambda)$$

c) für die beiden Gruppen der deutanopen Beobachter
(DAP1 bzw. DAP2)

$$c_1) \quad \bar{x}(\lambda)_{\text{DAP1}} = 0,0 \quad \bar{r}(\lambda) + 0,0 \quad \bar{g}(\lambda) + 0,0 \quad \bar{b}(\lambda)$$

$$\bar{y}(\lambda)_{\text{DAP1}} = 0,00171 \quad \bar{r}(\lambda) + 0,0134 \quad \bar{g}(\lambda) + 0,00106 \quad \bar{b}(\lambda)$$

$$\bar{z}(\lambda)_{\text{DAP1}} = 0,00 \quad \bar{r}(\lambda) + 0,00418 \quad \bar{g}(\lambda) + 0,0263 \quad \bar{b}(\lambda)$$

$$c_2) \quad \bar{x}(\lambda)_{\text{DAP2}} = 0,00562 \quad \bar{r}(\lambda) + 0,0 \quad \bar{g}(\lambda) + 0,00133 \quad \bar{b}(\lambda)$$

$$\bar{y}(\lambda)_{\text{DAP2}} = 0,0 \quad \bar{r}(\lambda) + 0,0 \quad \bar{g}(\lambda) + 0,0 \quad \bar{b}(\lambda)$$

$$\bar{z}(\lambda)_{\text{DAP2}} = 0,0 \quad \bar{r}(\lambda) + 0,00418 \quad \bar{g}(\lambda) + 0,0263 \quad \bar{b}(\lambda)$$

d) für die Gruppe der protanomalen Beobachter (PAL)

$$\bar{x}(\lambda)_{\text{PAL}} = 0,0045 \quad \bar{r}(\lambda) + 0,0028 \quad \bar{g}(\lambda) + 0,004 \quad \bar{b}(\lambda)$$

$$\bar{y}(\lambda)_{\text{PAL}} = 0,00183 \quad \bar{r}(\lambda) + 0,0128 \quad \bar{g}(\lambda) + 0,00126 \quad \bar{b}(\lambda)$$

$$\bar{z}(\lambda)_{\text{PAL}} = 0,00159 \quad \bar{r}(\lambda) + 0,00344 \quad \bar{g}(\lambda) + 0,0218 \quad \bar{b}(\lambda)$$

e) für die Gruppe der deutanomalen Beobachter (DAL)

$$\bar{x}(\lambda)_{\text{DAL}} = 0,0134 \quad \bar{r}(\lambda) + 0,00664 \quad \bar{g}(\lambda) + 0,003098 \quad \bar{b}(\lambda)$$

$$\bar{y}(\lambda)_{\text{DAL}} = 0,00087 \quad \bar{r}(\lambda) + 0,0135 \quad \bar{g}(\lambda) + 0,001 \quad \bar{b}(\lambda)$$

$$\bar{z}(\lambda)_{\text{DAL}} = 0,00159 \quad \bar{r}(\lambda) + 0,00344 \quad \bar{g}(\lambda) + 0,0218 \quad \bar{b}(\lambda)$$

6.3: Besprechung der Spektralwertkurven

6.31: Protanopen-Kurven (Abb. 23)

R-Kurve: Eine Rotkurve konnte nicht erzeugt werden.

G-Kurve (Abb. 23a): Eine Verschmälerung der Basis ist im Vergleich zur CIE-Norm vorhanden. Im Bereich von etwa 510 nm bis etwa 560 nm liegt der Kurvenzug höher als normal und ab 560 nm tiefer. Diese Verkürzung des langwelligen Bereichs ist u. a. aus Untersuchungen von PITT [129] und WRIGHT [227] bekannt. Siehe auch JUDD [71], LEGRAND [102].

B-Kurve (Abb. 23b): Eine Verschmälerung der Basis im Vergleich zur CIE-Norm ist in der Verkürzung sowohl am langwelligen als auch am kurzwelligen Anteil der Blaukurve begründet.

Einen Austausch von Primärvalenzen, wie es bei Deutanopen möglich war, akzeptierten die Protanopen nicht. Sie konnten die Gleichheitseinstellungen nur mit den Primärvalenzen *G* und *B* durchführen. Damit dürften sie als Dichromaten klassifiziert sein.

6.32: Protanomalen-Kurven (Abb. 24)

R-Kurve (Abb. 24a): Es liegt eine Verkürzung am langwelligen Spektrumsende vor. Die Kurve verläuft im Bereich von 560 nm bis 600 nm überhöht und unterhalb von 560 nm niedriger. Die Basis ist verschmälert und das Maximum in den kurzwelligen Bereich verschoben.

G-Kurve (Abb. 24b): Der Verlauf weicht nur gering vom normalen ab.

B-Kurve (Abb. 24c): Der Verlauf weicht nicht wesentlich von dem der anderen Trichromaten ab.

Eine Verschiebung zum kurzwelligen Spektrumsende für alle drei Primärvalenzen wurde von HURVICH und JAMESON [62] beschrieben.

Ein Verlust der Hellempfindlichkeit im Langwellenbereich ist u. a. von WRIGHT [227] festgestellt worden. Dieser Verlust ist ähnlich dem für Protanope [3].

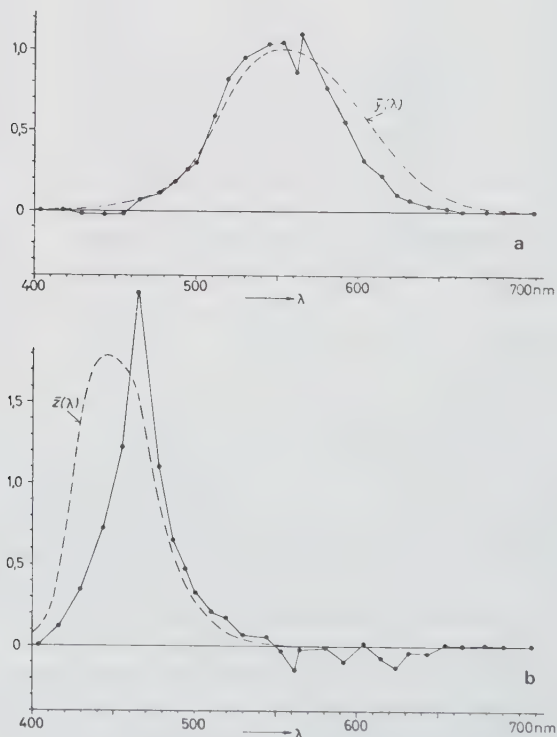


Abb. 23: Meßergebnisse an der Protanopen-Gruppe

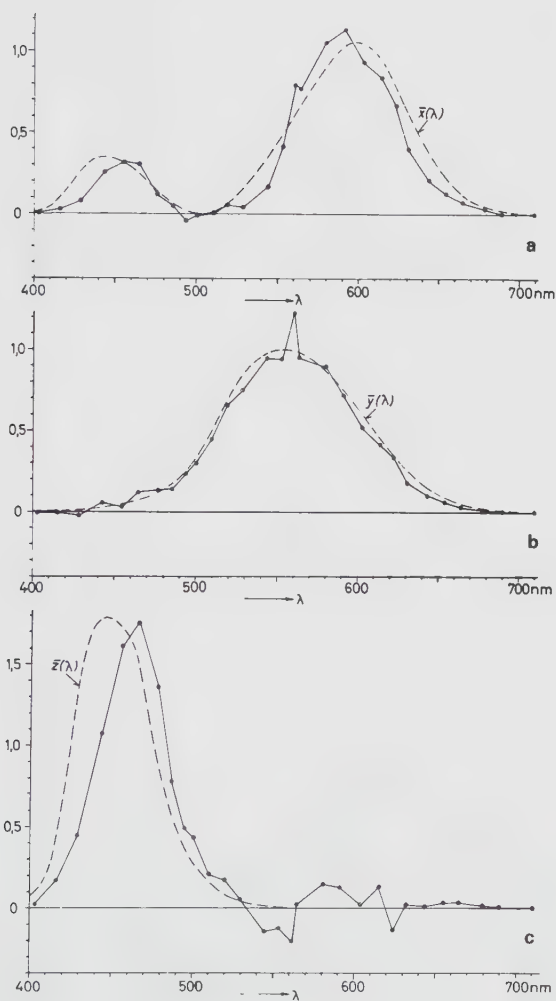


Abb. 24: Meßergebnisse an der Protanomalen-Gruppe

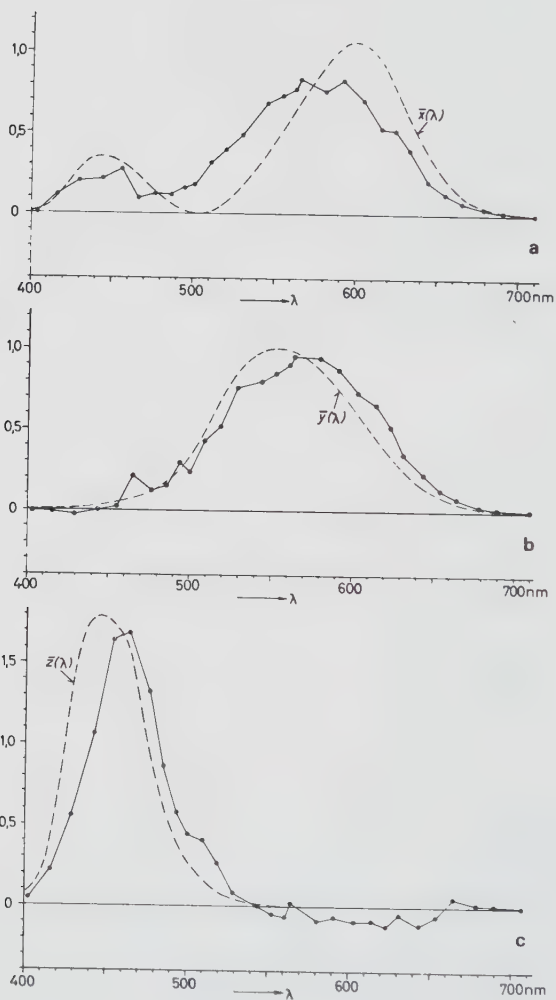


Abb. 25: Meßergebnisse an der Deuteranopen-Gruppe

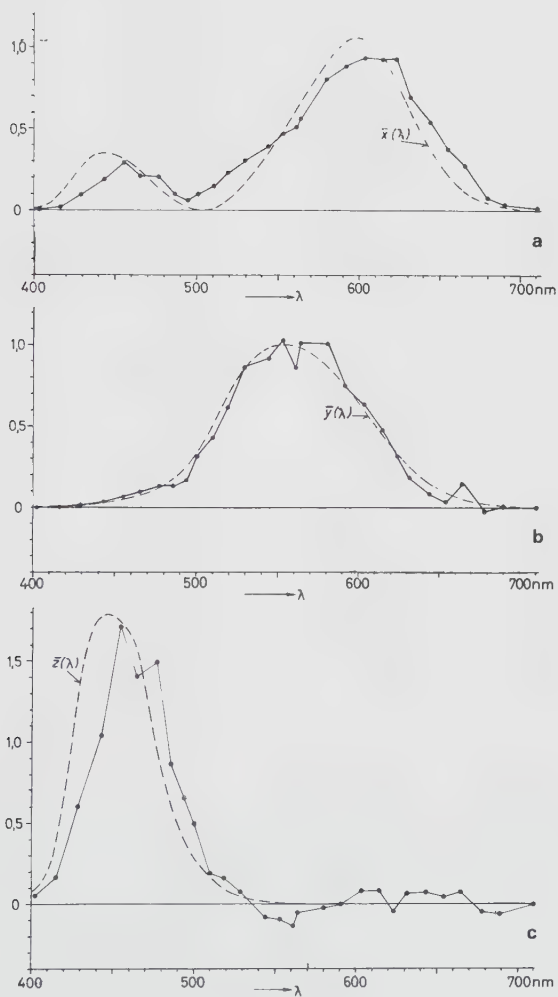


Abb. 26: Meßergebnisse an der Deutanomalen-Gruppe

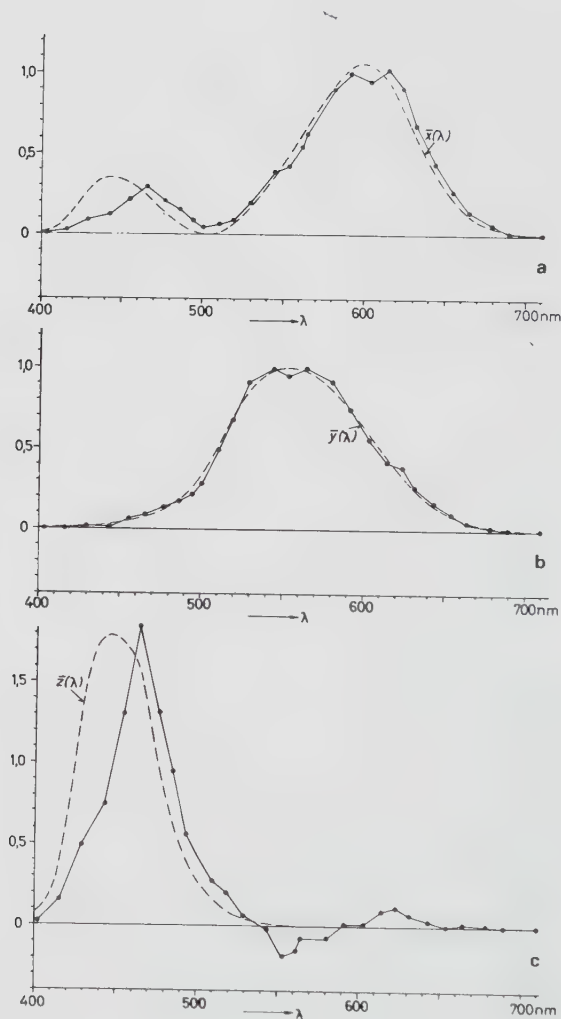


Abb. 27: Meßergebnisse an der Normalen-Gruppe

Tab. 7: Beispiel für die ausgegebenen Zahlenwerte einer Gruppe (entsprechend Abb. 26c)

λ	$\bar{z}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)_{\text{DAL}}$	$\bar{z}(\lambda) - \bar{z}(\lambda)_{\text{DAL}}$
403	0.089153	0.054601	0.034552
416	0.416209	0.166749	0.249460
429	1.323929	0.607219	0.716710
443	1.776263	1.042510	0.733753
455	1.744100	1.713461	0.030639
465	1.528100	1.405459	0.122641
477	0.947300	1.498479	-0.551179
486	0.582328	0.865594	-0.283266
494	0.372946	0.654071	-0.281125
500	0.272000	0.497776	-0.225776
510	0.158200	0.192363	-0.034163
519	0.083845	0.165816	-0.081971
529	0.044898	0.079651	-0.034753
544	0.014584	-0.079690	0.094274
553	0.006800	-0.091890	0.098690
561	0.003623	-0.133002	0.136625
564	0.002935	-0.051243	0.054178
580	0.001650	-0.022206	0.023856
591	0.001069	0.001811	-0.000743
603	0.000685	0.081886	-0.081201
614	0.000251	0.088127	-0.087876
623	0.000135	-0.040807	0.040942
631	0.000044	0.071695	-0.071651
643	0.000014	0.073435	-0.073421
654	0.000000	0.048319	-0.048319
664	0.000000	0.084479	-0.084479
678	0.000000	-0.048396	0.048396
689	0.000000	-0.060242	0.060242
709	0.000000	0.002022	-0.002022

6.33: Deutanopen-Kurven (Abb. 25)

R-Kurve (Abb. 25a): Eine Verschiebung zum kurzwelligen Spektrumsbereich wird durch das Maximum bei 580 nm angezeigt. Das zweite Maximum im Blau-Bereich findet sich bei der G-Kurve nicht wieder. Die R-Kurve wurde von 3 Vpn. im Zusammenhang mit den Messungen durch die Meßvalenzen R und B erzeugt. Denselben Personen war es ferner möglich, mit den Meßvalenzen G und B eine G-Kurve aufzuzeichnen.

G-Kurve (Abb. 25b): Es ist eine Verschiebung zum langwelligen Spektralbereich abzulesen. Das Maximum befindet sich bei 570 nm. Beides ist aus Untersuchungen unter anderem durch PITT [129], WRIGHT [227], LEGRAND [102] und JUDD [71] bekannt.

B-Kurve (Abb. 25c): Die B-Kurve ist bei Messungen mit den Primärvalenzen B und G gleich der bei Messungen mit den Primärvalenzen B und R. Die größere Anzahl der Deutanopen mischte die Gleichheitseinstellungen mit den Primärvalenzen B und G. Für die B-Kurve wurden beide Gruppen zusammengenommen.

6.34: Deuteranomalien-Kurven (Abb. 26)

R-Kurve (Abb. 26a): Eine Verbreiterung der Basis geht mit einer Verschiebung des Maximums zum Langwellenbereich einher.

G-Kurve (Abb. 26b): Eine Verschiebung zum langwelligen Bereich ist so gering, daß man den Verlauf mit dem für den normalen Beobachter gleichsetzen kann.

B-Kurve (Abb. 26c): Der Verlauf gleicht dem für den normalen Beobachter ebenso wie für den protanormalen Beobachter.

Eine Verschiebung der Maxima zum Langwellenbereich für alle drei Spektralwertkurven wurde von HURVICH und JAMESON [62] und RICHTER und TERSTIEGE [149] beschrieben.

6.35: Normalen-Kurven (Abb. 27)

Es wurden Spektralwertkurven von farbennormalsichtigen Beobachtern unter denselben Bedingungen am DFM gemessen, wie sie für farbenfehlsichtige Beobachter vorlagen. Die Auswertung erfolgte in gleicher Weise wie für die Farbenfehlsichtigen.

In der Abb. 27 sind die CIE-Normspektralwertkurve und die Spektralwertkurve des farbennormalsichtigen Beobachters, gemessen am DFM, vergleichend dargestellt. Man sieht gute Übereinstimmungen in den R- und G-Kurven, aber eine Abweichung in der B-Kurve. Das liegt an den verschiedenen Primärvalenzen beider Systeme.

Die B-Kurven der Trichromaten haben ein zweites Maximum im Langwellenbereich korrespondierend zum Maximum der Rotkurve, die ebenfalls zwei Maxima aufweist.

Es wurden die am DFM gemessenen Kurven für Farbenfehlsichtige jedoch nicht mit diesen am DFM gemessenen Kurven für den farbennormalsichtigen Beobachter verglichen, sondern mit den CIE-Normspektralwertkurven.

6.4: Vergleich der Kurven untereinander

R-Kurven (Abb. 28): Die R-Kurven haben zwei Maxima. Die Schnittpunkte der Kurven für Protanomale und Deuteranomale mit der CIE-Kurve liegen etwa bei 485 nm und 560 nm. Die Kurve der Deuteranopen schneidet nur bei etwa 485 nm, nicht jedoch etwa bei 560 nm.

G-Kurven (Abb. 29): Schnittpunkt der Kurven für Protanope, Protanomale, Deuteranope, Deuteranomale mit der CIE-Kurve etwa bei 570 nm.

B-Kurven (Abb. 30): Die B-Kurven der Trichromaten haben zwei Maxima. Schnittpunkte aller Kurven etwa bei 500 nm und 560 nm.

Die Schnittpunkte (etwa 485 nm und 560-570 nm) stellen Neutralstellen im Spektrum dar (s. 2.12). Eine Gleichheitseinstellung in diesen Bereichen wird mit einer größeren Fehlerbreite gemischt.

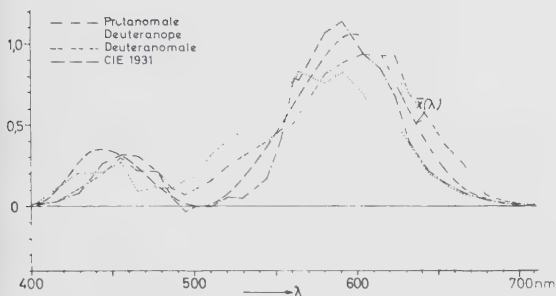


Abb. 28: Vergleich der R-Kurven

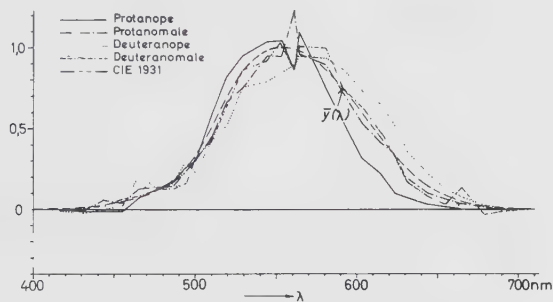


Abb. 29: Vergleich der G-Kurven

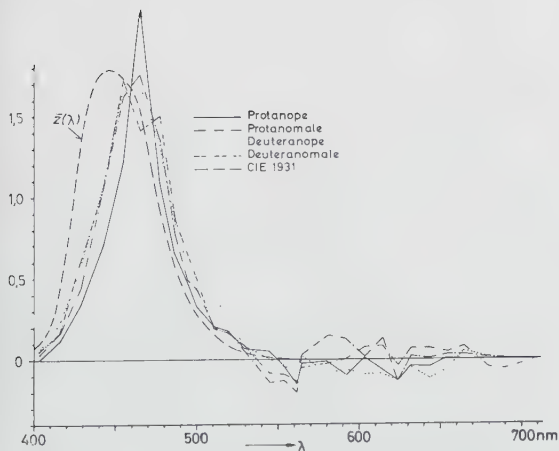


Abb. 30: Vergleich der B-Kurven

7. Diskussion der Ergebnisse

7.1: Theorie der Farbenfehlsichtigkeit

7.11: Dichromaten

Der Verlauf der G-Kurve der Deuteranopen verglichen mit dem der Protanopen verhält sich entsprechend einem Vergleich der Verläufe der R-Kurven der anomalen Trichromaten (vergleiche Abb. 31 mit Abb. 36).

Schon 1893 waren KÖNIG und DIETERICI [77] der Ansicht, daß den Protanopen der rote Rezeptor fehle und den Deuteranopen entsprechend der grüne. Andere Untersuchungen von LEBER [100] und FICK [32] aus den Jahren 1869 beziehungsweise 1879 stützen die Hypothese, daß es sich bei der Deuteranopie nicht um das Fehlen eines Pigments oder Rezeptors im Rot-Grün-Bereich handelt, sondern um eine Fusion der Rot-Grün-Empfindungen zu einer möglicherweise einheitlichen Gelbempfindung. Dieser Streit ist bis heute nicht entschieden, und es ist dabei die Frage aufgeworfen worden, ob es zwei verschiedene Typen von Deuteranopen gibt (ALPERN [1]).

Für die Fusionstheorie sprechen nach diesen Untersuchungen folgende Tatsachen:

a) Es ist Deuteranopen möglich, Gleichheitseinstellungen sowohl mit den Primärvalenzen B und G als auch mit den Primärvalenzen B und R zu erfüllen. Deuteranope verwechseln R und G im R-G-Bereich. Ein Austausch von Primärvalenzen in dieser Form war Protanopen nicht möglich.

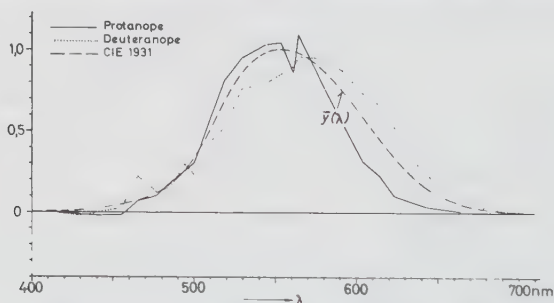


Abb. 31: Vergleich der G-Kurven der Protanopen und Deuteranopen

b) Die Rotkurve der einen Deuteranopen-Gruppe schneidet die CIE-Kurve nicht bei 560 nm, wie es die R-Kurven der Trichromaten tun (s. Abb. 28).

c) Nur Deuteranope stellen Mischungen im Bereich von 560 nm sicher ein (siehe 6.4). Die anderen Farbenfehlsichtigen zeigen in diesem Wellenlängenbereich eine größere Fehlerbreite.

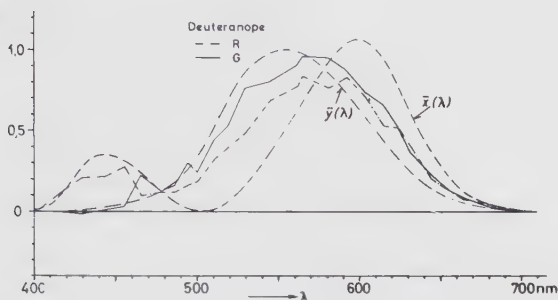


Abb. 32: Vergleich der R- und G-Kurven der Deuteranopen

d) Die B-Kurve im Blaubereich verläuft ähnlich der für normale und anomale Trichromaten. Dazu im Gegensatz steht die verschmälerte B-Kurve der Protanopen (siehe Abb. 34).

Nimmt man an, Deuteranopie beruhe auf dem Ausfall des Grünrezeptors, so ließe sich dafür folgendes Argument anführen:

Die G-Kurve verläuft im Grünbereich tiefer als die CIE-Kurve und im Rotbereich höher. (Entsprechend umgekehrt verhält sich die G-Kurve des Protanopen: Sie verläuft im Rotbereich tiefer und im Grünbereich höher, siehe Abb. 31).

Die anderen oben aufgeführten Argumente im Zusammenhang mit der Fusionstheorie müßten jetzt als Folge der spezifisch neuronal nachgeordneten Verschaltung angesehen werden.

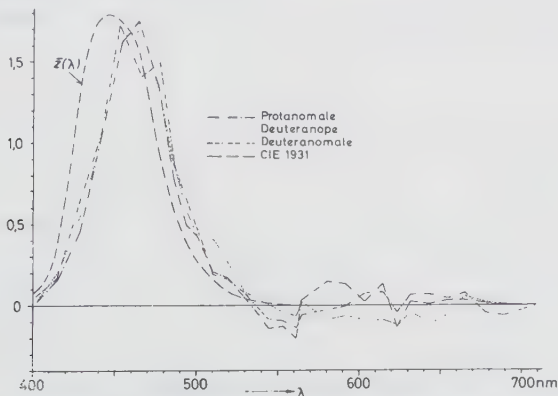
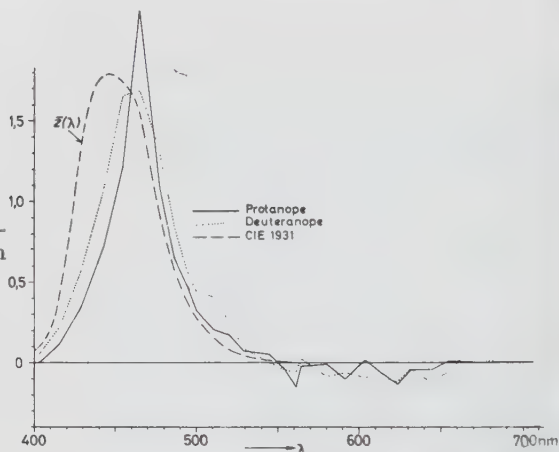


Abb. 33: Vergleich der B-Kurven der Deuteranopen, Deuteranomalien und Protanomalien

Abb. 34: Vergleich der B-Kurven der Protanopen und Deuteranopen



Die Hypothese des selektiven Ausfalls des Grünrezeptors bei Deuteranopen wird u. a. von den Autoren ALPERN [1], NIMEROFF [122], RUSHTON [159], WALRAVEN [217] vertreten.

Man kann wohl annehmen, daß den Protanopen, wie auch von den Autoren RUSHTON [161], TRENDELENBURG [192] vermutet, der rote Rezeptor fehlt. Sie benötigen für die Gleichheitseinstellungen die Primärvalenzen Grün und Blau. Der Rotbereich ist stark reduziert (siehe dazu PITT [129], WRIGHT [227]).

Vielleicht beruht der Bereich der G-Kurve von etwa 510 nm bis etwa 570 nm, der oberhalb der CIE-Kurve verläuft, auf einer konsekutiven Enttömmung.

Die Verschmälerung der B-Kurve sollte ebenfalls als Folge des Verlustes des Rotrezeptors interpretiert werden.

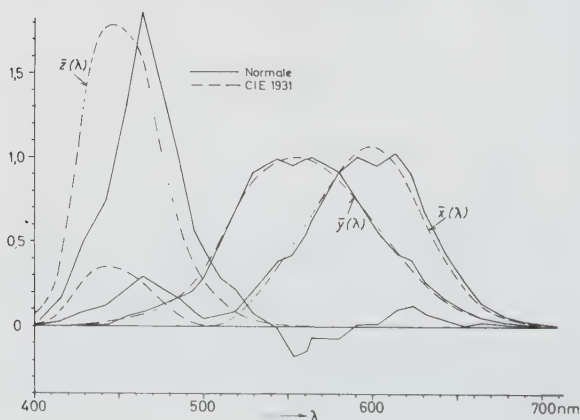
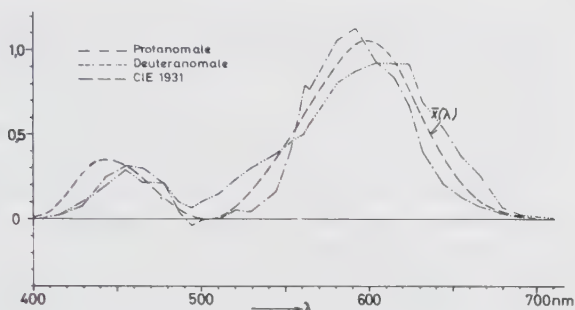


Abb. 35: Kurven der Normalen-Gruppe

Abb. 36: Vergleich der R-Kurven der Protanomalen und Deuteranomalien



7.12: Anomale Trichromaten

Der Unterschied der anomalen Trichromaten zum normalen Trichromaten zeigt sich nicht so sehr in den G-Kurven als in den R-Kurven. Dies geht auch aus den Transformationsmatrizen hervor (6.2). Die Umrechnungsfaktoren der B- und G-Kurven sind dagegen für die Trichromaten annähernd gleich.

Untersuchungen durch v. STUDNITZ [186] nach Applikation eines Stoffes, den er Helenien nannte, ergaben Anomaloskopeinstellungen für Protanomalie, die normal waren, und für Normale, die deuteranomal waren. Der Stoff bewirkte offensichtlich eine „Konzentrationserhöhung des Sehstoffes“ (TERSTIEGE [188]). Es zeigte sich jedenfalls ein gegenteiliger Effekt auf den Sehstoff wie es Blendung oder Hypoxie (POLGAR [131]) bewirken.

1881 beschreibt RAYLEIGH [136], daß der Protanomalie in der Gleichheitseinstellung am Anomaloskop mehr Rot zum Angleich an Gelb benötigte als der normale Beobachter.

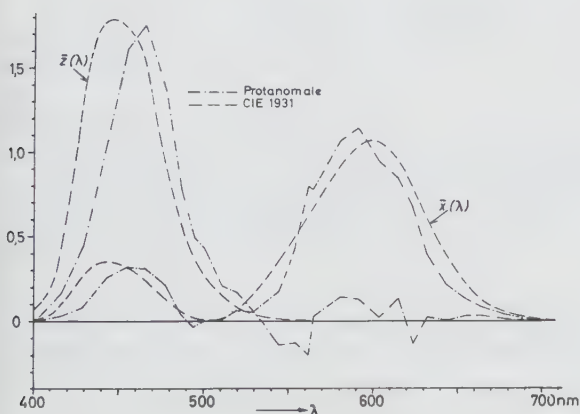


Abb. 37: R- und B-Kurve der Protanomalien

BRINDLEY [10], FEDOROV und FEDOROVA [28], TERSTIEGE [188], SPELLMANN und KRAUSKOPF [176], DE VRIES [208] erzeugen mit hohen Blendungen eine Protanomalie am normalen Trichromaten.

BRINDLEY interpretiert die so erworbene Protanomalie als eine selektive Ausbleichung des R-Rezeptors, während TERSTIEGE von einer „Konzentrationserniedrigung des Sehstoffes“ spricht. Nach ALPERN [3] soll die Antwort eines der drei Zapfen anders als normal sein. RUSHTON und BAKER [163] schließen aus Untersuchungen, daß in der Fovea die Anzahl der Rot-Zapfen reduziert sei.

Bei diesen Messungen konnte eine Labilität des Rotrezeptors des Protanormalen festgestellt werden. So bricht eine Gleichheitseinstellung des Protanormalen im langwelligen Bereich bis etwa 560 nm eher zusammen als die des Deuteranormalen und der Übergang zum Protanopen, der also keinen Rotrezeptor hat, wird dann oft schwierig.

Eine höhere Fehlerbreite in diesem Bereich zeigt die statistische Auswertung.

7.2: Prüfung der Farbenfehlsichtigkeit

(Vergleich zwischen Untersuchungen am Anomaloskop und DFM)

Für die Entscheidung, ob eine Rot- oder Grünstörung vorliegt, ist, soweit die Erfahrung dieser Untersuchung zeigt, das Anomaloskop als Methode definitiv. Schwierig wird eine Differenzierung zwischen Anopie und Anomalie, hält man sich an die Richtlinien des FNF [39]. Die Grenzgleichung mit $RG = 0$ wird von Anormalen unter Umständen leicht angenommen. Wir fanden jedoch drei Vpn., die eine Grenzgleichung mit $RG = 0$ und der Ergänzung $Ge = 25-33$, wie es für Protanopie definiert ist, anerkennen und dennoch zu den Protanormalen gerechnet werden müssen, weil sie Gleichheitseinstellungen am DFM nur mit drei Primärvalenzen aufstellen können⁶. Damit wird das Anomaloskop zur Differentialdiagnose zwischen Protanomalie und Protanopie unzuverlässig.

Die am DFM gemessenen Spektralwertkurven für anormale Trichromaten zeigen eine Abweichung des Farbensinns vom Normalen vorwiegend im Rot.

Das Anomaloskop ist so gebaut, daß bei Einblendung von Grün das Rot um den gleichen Betrag reduziert wird, und umgekehrt wird durch die Verschiebung der Spaltbacke im Anomaloskop das Grün um den gleichen Betrag reduziert wie Rot eingeblendet wird. Es besteht eine Abhängigkeit für das Mischungsverhältnis der Spektrallichter Rot und Grün (siehe 3.2.1 und Abb. 8).

Mischt ein Deuteranomaler mehr Grün in der Gleichheitseinstellung am Anomaloskop, so sagt dies ebenso, er benötige weniger Rot als der normale Beobachter. Ein „Grünschwachsichtiger“ ist also ein „Rotstarksichtiger“.

⁶ Vergleiche [191, S. 101]: atypische Dichromaten, Subdichromaten

ein Protanomaler bliebe ein „Rotschwachsichtiger“. (M. RICHTER weist auf die irrtümliche Vorstellung hin, die mit den Bezeichnungen „Grün-schwacher“ und „Rotschwacher“ verbunden werden [141].)

8. Zusammenfassung

Am DFM wurden unter Verwendung einer Serie von Interferenzfiltern (*Schott & Gen.*) Spektralwertkurven von 31 deuteranomalen, 8 deuteranopen, 13 protanomalen, 10 protanopen und 6 normalen Beobachtern mit 29 verschiedenen Spektralfarben von 403 nm bis 709 nm bestimmt. Die Meßreihen wurden einer statistischen Auswertung unterzogen. Mit den Mittelwerten wurde eine Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate durchgeführt. Ein Plotter zeichnete die Spektralwertkurven.

Es zeigte sich auf Grund der guten Ergebnisse, daß man für eine solche Untersuchung nicht unbedingt einen Spektralfarbenmischapparat benötigt, der die Spektralfarben über ein Prisma erzeugt, sondern die Erzeugung von spektralreinen Farben mit den benutzten Interferenzfiltern hinreichend genau ist. Damit ergeben sich Möglichkeiten für den Bau von einfachen und handlichen Spektralfarbenmischapparaten. Ein handliches Dreifarbenmischgerät wird für die Unterscheidung der Rotstörungen bei Berufsfahrern (siehe Tab. 4) als sinnvoll angesehen.

Das Anomaloskop ist für eine Entscheidung, ob eine Rot- oder Grünstörung vorliegt, als Untersuchungsmethode definitiv. Es ist sicher unzureichend für die Unterscheidung zwischen Protanomalie und Protanopie, speziell dann, wenn Protanomale schon Protanopengleichungen anerkennen.

Nur mit einem DFM läßt sich eine aussagekräftige Diagnose über den Dreifarben-Sehmechanismus erreichen.

8.1: Dichromaten

Protanope sind Dichromaten, denen vermutlich der Rotrezeptor fehlt.

Deuteranope sind Dichromaten, bei denen die dritte Spektralwertkurve entweder mit einer der anderen beiden verschmolzen ist oder (entsprechend der Protanopie) einfach fehlt.

8.2: Anomale Trichromaten

Sie unterscheiden sich vom farbennormalsichtigen Beobachter hauptsächlich im Verhalten ihrer Rotkurve. Die Störung befindet sich bei Protanomen und Deuteranomalien vorwiegend im Rotrezeptor. Beide scheinen rotgestört, wenn auch in anderem Sinne.

Anhang: Definitionen aus der Farbmatrik

Farbempfindung

- Farbton:** beschreibt Art der Buntheit, z. B. rot, grün, blau.
- Sättigung:** beschreibt Grad der Buntheit; je ähnlicher eine Farbe dem Grau (Unbunt), desto ungesättigter ist sie und je reiner sie erscheint, desto gesättigter ist sie.
- Helligkeit:** keine Farbe (außer Schwarz) kann ohne gleichzeitige Helligkeit sein, zur Kennzeichnung dient der Hellbezugswert A für Körperfarben.
Bei Lichtquellen ist der Normfarbwert Y der Leuchtdichte proportional.
- Farbvalenz:** ist die einheitliche und untrennbare Gesamtwirkung einer in das helladaptierte Auge einfallenden Strahlung, die vom Empfängerapparat des Auges nach drei voneinander unabhängigen, spektral verschiedenen Wirkungsfunktionen linear und stetig bewertet wird. Diese einheitlich empfundene und unauflösbare Gesamtwirkung setzt sich aus den Einzelwirkungen additiv zusammen (RICHTER [142; 143]). Sie wird durch einen vom Schwarzpunkt ausgehenden Farbvektor im dreidimensionalen Raum (Farbenraum) dargestellt:

$$\mathfrak{F} = R\mathfrak{R} + G\mathfrak{G} + B\mathfrak{B}$$

Die Farbvalenz wird durch Umstimmung, Umfeldeinflüsse nicht berührt. Allerdings darf das Gesichtsfeld weder zu groß noch zu klein, die Leuchtdichte weder zu hoch noch zu gering sein.

Farbmessungen beziehen sich stets nur auf Farbvalenzen.

- Primärvalenzen:** sind drei Farbvalenzen, mit denen durch additive Mischung andere reelle Farbvalenzen nachgemischt werden können (die P . in einem Dreifarbenmeßgerät heißen Meßvalenzen).
 $\mathfrak{R}, \mathfrak{G}, \mathfrak{B}$
- Normvalenzen:** sind virtuelle (d. h. nur rechnerisch darstellbare) Primärvalenzen; sind international vereinbart.
 $\mathfrak{X}, \mathfrak{Y}, \mathfrak{Z}$
- Grundvalenzen:** sind ebenfalls virtuelle Primärvalenzen, denen aber eine physiologische Bedeutung zugerechnet wird (Fehlfarben der Dichromaten).
 $\mathfrak{P}, \mathfrak{D}, \mathfrak{T}$
- Farbwerte:** sind Beträge der Primärvalenzen, die benötigt werden, um die vorgegebene Farbe additiv nachzumischen.
 R, G, B
- Farbwertanteile:** müssen ihrer Definition zufolge als Summe ($r+g+b=1$) ergeben. Sie werden benutzt, um die Farböter in der Farbtabelle einzutragen.
 r, g, b

$$r = \frac{R}{R + G + B} \text{ usw.}$$

- Spektralwerte:** die Farbwerte der Spektralfarben.

$$\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda) \quad R = \int \varphi_{\lambda} \bar{r}(\lambda) d\lambda \quad G = \int \varphi_{\lambda} \bar{g}(\lambda) d\lambda \quad B = \int \varphi_{\lambda} \bar{b}(\lambda) d\lambda$$

- Normspektralwerte:** auf die Normvalenzen bezogene Farbwerte der Spektralfarben; definieren den internationalen farbmtrischen Normalbeobachter (CIE 1931).
 $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$

bedingt-gleiche Farben: gleiche Farbvalenzen mit unterschiedlichen Farbreizen. Sie haben zwar gleiche Farbwerte, aber unterschiedliche Farbreizfunktionen

$$\mathfrak{F}_1 = \mathfrak{F}_2 \quad \int_{\lambda} q_{1,\lambda} \bar{r}(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda} q_{2,\lambda} \bar{r}(\lambda) d\lambda = R$$

$$q_{1,\lambda} \neq q_{2,\lambda} \quad \int_{\lambda} q_{1,\lambda} \bar{g}(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda} q_{2,\lambda} \bar{g}(\lambda) d\lambda = G$$

$$\int_{\lambda} q_{1,\lambda} \bar{b}(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda} q_{2,\lambda} \bar{b}(\lambda) d\lambda = B$$

unbedingt-gleiche Farben: sind Farbvalenzen mit gleichen Farbreizen.

$$\mathfrak{F}_1 = \mathfrak{F}_2 \quad \varphi_{\lambda 1} = \varphi_{\lambda 2}$$

Farbreiz: ist eine Strahlung, die durch unmittelbare Reizung der Netzhaut Farbempfindungen hervorrufen kann. Die spektrale Beschaffenheit eines Farbreizes wird durch die Farbreizfunktion φ_{λ} beschrieben.

Lichtfarbe: ist die Farbe einer Lichtart. Sie wird valenzmetrisch durch die Farbart gekennzeichnet. Die Farbreizfunktion φ_{λ} ist für Selbstleuchter identisch mit der Strahlungsfunktion $\varphi_{\lambda} = S_{\lambda}$.

Körperfarbe: ist die Farbe eines Körpers, der zur Sichtbarkeit einer beleuchtenden Strahlung bedarf. Die ihr zukommende Farbreizfunktion φ_{λ} ist gegeben durch

$$\varphi_{\lambda} = \beta(\lambda) \cdot S_{\lambda} \quad \text{bzw.} \quad \varphi_{\lambda} = \tau(\lambda) \cdot S_{\lambda}$$

$$\beta(\lambda) = \text{spektraler Remissionsgrad}$$

$$\tau(\lambda) = \text{spektraler Transmissionsgrad}$$

spektraler Remissionsgrad: ist ein wellenlängenabhängiger „Rückwerfungsfaktor“ und wird als spektrale Objektkennzahl spektrophotometrisch bestimmt

$$\beta(\lambda) = L_{e,\lambda} / L_{e,\lambda, \text{weiß}}$$

spektraler Transmissionsgrad: wie oben für „Durchlassung“, (z. B. Filter)

$$\tau(\lambda) = \Phi_{\lambda} / \Phi_{\lambda, 0}$$

Farbart: Farbvalenzen sind artgleich, wenn sie sich nur durch ihre Helligkeit (Hellbezugswert bei Körperfarben, Leuchtdichte bei Selbstleuchtern) unterscheiden. In der Farbgleichung unterscheiden sich artgleiche Farbvalenzen $\mathfrak{F}_1$ und $\mathfrak{F}_2$ nur durch einen Proportionalitätsfaktor an den Farbwerten. Artgleiche Farben sind durch Vektoren gleicher Richtung, aber verschiedener Länge dargestellt. In der Farbtabelle entspricht jeder Farbart ein Farbort.

Schrifttum

- [1] ALPERN, M., G. B. LEE, F. MAASEIDVAAG u. S. S. MILLER, Colour vision in blue-cone „Monochromacy“. J. Physiol. (Lond.), **212** (1971), S. 211-233
- [2] ALPERN, M., J. MINDEL u. S. FORI, Are there two types of deuteranopes? J. Physiol., **199** (1968), S. 433-456
- [3] ALPERN, M. u. S. TORII, Preceptor colour vision distortions in protanomalous trichromacy. J. Physiol. (London) **198** (1968), S. 549-60
- [4] AHLENSTIEL, H., Straßenverkehr und Farbensinn. Farbe **4** (1955), S. 33-36; Nr. 2/3
- [5] ANGEL, A., F. MAGNI u. P. STRATA, Evidence for pre-inhibition in the lateral geniculate body. Nature **208** (1965), S. 495-496; Nr. 5009
- [6] BAKER, H. D., u. W. A. H. RUSHTON, The red-sensitive pigment in normal cones. J. Physiol. **176** (1965), S. 56-72
- [7] BECK, H. u. M. RICHTER, Neukonstruktion des Dreifarben-Meßgerätes nach Guild-Bechstein. Farbe **7** (1958), S. 141-152; Nr. 4
- [8] BAM-Lehrgang „Praktische Farbmessung“ (1971)
- [9] BLACKWELL, H. R. und O. M. BLACKWELL, Rod and cone receptor mechanisms in typical and atypical congenital achromatopsia. Vision **1** (1961), S. 62-107
- [10] BRINDLEY, G. S., The effects on colour vision of adaptation to very bright lights. J. Physiol. **122** (1953), S. 332-350; Nr. 2
- [11] BROSCHMANN, D., Der Farbenuntüchtige und seine Umwelt. Klin. Mbl. Augenheilkunde **148** (1966), S. 290-293; Nr. 2
- [12] BROWN, P. K. u. G. WALD, Visual pigments in human and monkey retinas. Nature **200** (1963), S. 37-42; Nr. 4901
- [13] BROWN, P. K. u. G. WALD, Visual pigments in single rods and cones of the human retina. Science **144** (1964), S. 45-52
- [14] BURCH, G. J., On artificial temporary colour blindness with an examination of the colour sensations of 109 persons. Phil. Trans. (B) **191** (1899), H. 1, S. 1-34; Proc. Roy. Soc. **63** (1898), S. 35-38
- [15] CAVALLI-SFORZA, L., Biometrie. Stuttgart: Fischer 1969
- [16] COPENHAVER, R. M., u. R. D. GUNKEL, The spectral sensitivity of color-defective subjects determined by electroretinography. Arch. Ophthalm. (USA) **62** (1959), S. 55-68
- [17] DARTNALL, H. J. A., Visual pigments of colour vision. In: Mechanisms of colour discrimination. (Symposium Paris 1958) London 1960; S. 147-161
- [18] DARTNALL, H. J. A., Visual pigments. London: Methuen & Co. 1957
- [19] DARTNALL, H. J. A., The visual pigments and their function in vision. Brit. J. physiol. Opt. **15** (1958), S. 140-153; Nr. 3
- [20] Deutsche Normen: DIN 5033 „Farbmessung“ (1954 ff.); DIN 6160 „Anomaloskop nach Nagel“ (1966); DIN 6169 „Farbwiedergabe“ (1966)
- [21] DOBELLE, W. H., W. B. MARKS, W. B. u. E. F. MACNICHOL jr., Visual pigment density in simple primate foveal cones. Science **166** (1969), S. 1508-1510
- [22] DODT, E., Lichtsinn. In: Keidel, Lehrbuch der Physiologie. Leipzig: Thieme 1968 S. 375-398
- [23] DOWLING, J. E. u. B. B. BOYCOTT, Organization of the primate retina; light microscopy. Phil. Trans. Roy. Soc., **B 255** (1966), S. 109-184
- [24] DOWLING, J. E. u. B. B. BOYCOTT, Organization of the primate retina; electron microscopy. Proc. Roy. Soc., **B 166** (1966), S. 80-111
- [25] DOWLING, J. E. u. F. S. WERBLIN, Synaptic organization of the vertebrate retina. Vision Res., Suppl. 3, (1971), S. 1-15
- [26] FARNSWORTH, D., Tritanomalous vision as a threshold function. Farbe **4** (1955), S. 185-196; Nr. 4/6

- [27] FEDOROV, N. T., The additivity of spectral heterochromatic luminances in connexion with the revision of standard spectral mixture curves. In: Visual problems of colour (Symposium Teddington 1957) (London: 1958), Bd. 1, S. 305-316
- [28] FEDOROV, N. T. u. V. I. FEDOROVA, Untersuchungen auf dem Gebiete des Farbensehens. J. Physiol. **57** (1929), S. 855-864
- [29] FEDOROV, N. T. u. V. I. FEDOROVA, Untersuchungen über das Farbsehen (Russ.). Invest. Akad. Nauk. UdSSR **7** (1935), S. 1431-1435, Nr. 10
- [30] FEDOROV, N. T. u. J. FEDOROVA, Untersuchungen über das Farbsehen (Russ.). Bull. Inst. experim. Med. 1936, Nr. 5, S. 29-35
- [31] FEDOROV, N. T., M. A. JURJEV, V. V. SKLJAREVIČ u. O. F. MAŠIROVA, Über die Grundvalenzkurven für den mittleren Beobachter (Russ.). Problemy fiziol. Optiki **8** (1953), S. 98-111
- [32] FICK, A., in: HERMANN, L., Handbuch der Physiologie, Bd. 3, Teil 1, S. 129-234
- [33] FINCH, R. B., Physics in textile science. Physics Today **7** (1954), S. 12-15
- [34] FRANÇOIS, J., G. VERRIEST, P. FRANÇOIS u. R. ASSEMAN, Étude comparative des dyschromatopsies acquises associées aux différents types d'atrophie optique hétéro-familiale. Ann. oculist. **194** (1961), S. 217-235
- [35] FRANÇOIS, J., u. G. VERRIEST, Les dyschromatopsies acquises. Ann. oculist. **196** (1963), S. 713-46, 812-59, 903-43
- [36] FRANÇOIS, J., u. G. VERRIEST, Trois nouvelles observations d'achromatopsie congénitale atypique. Ann. oculist. **193** (1960), S. 123-136
- [36a] FRIEDRICH, L., Bestimmung der Spektralwertkurven normaler Trichromaten durch direkte Messungen nach einer neuen Methode. Farbe **5** (1956), S. 201-209; Nr. 3/6
- [37] FRIESER, H., Die Graßmannschen Gesetze. Farbe **2** (1953), S. 91-108
- [38] FRIESER, H., u. R. REUTHER, Zur Frage der Umstimmung. Farbe **4** (1955), S. 165-167; Nr. 4/6
- [39] *Fachnormenausschuß Farbe*. Anweisung für die Untersuchung des Farbensehens mit dem Anomaloskop nach Nagel. Farbe **6** (1957), S. 115-119; Nr. 3/4
- [40] FUCHS, G., Mathematik für Mediziner und Biologen. Heidelberger Taschenbücher, Berlin/Heidelberg: Springer 1969
- [41] GEBHARDT, E., Programm-Information DI-33 (1969), S. 70-74
- [42] GODER, G., 100 Jahre Duplizitätstheorie. Klin. Mbl. Augenheilkde. **150** (1967), S. 110-114; Nr. 1
- [43] GRAHAM, C. H., Color blindness. In: Vision and Visual Perception. New York: Wiley 1967, S. 396-413
- [44] GRAMBERG-DANIELSEN, B., Untersuchungen über die Unfallhäufigkeit von Farbenuntüchtigen im Straßenverkehr. Klin. Mbl. Augenheilkde. **139** (1961) S. 677-681; Nr. 5
- [45] GRAMBERG-DANIELSEN, B., Ophthalmologische Probleme im Rahmen des § 315a StGB. Klin. Mbl. Augenheilkde. **145** (1964), S. 449-450; Nr. 3
- [46] GRANIT, R., The organisation of the vertebrate retinal elements. Ergebn. Physiol. **46** (1950), S. 31-70
- [47] GRASSMANN, H., Zur Theorie der Farbenmischung. Poggendorfs Ann. Phys. **89** (1853), S. 69-84
- [48] GRÜTZNER, P., Typische erworbene Farbensinnstörungen bei heredodegenerativen Maculaleiden. Graefes Arch. Ophthalm. **163** (1961), S. 99-116
- [49] GRÜTZNER, P., Erworbene Farbensinnstörungen bei Netzhautdegeneration. Farbe **11** (1962), S. 35-44
- [49a] GRÜTZNER, P., u. W. JAEGER, Anleitung zur Untersuchung des Farbensinnes. In: Entwicklung und Fortschritte in der Augenheilkunde (Fortbildungskurs 1962) Stuttgart: Enke 1963

- [50] GRÜTZNER, P., Über erworbenen Farbensinnstörungen bei Sehnervenerkrankungen. Graefes Arch. Ophthalm. **169** (1966), S. 366-84
- [51] GRÜTZNER, P., Acquired color vision defects. In: Handbook of Sensory Physiology. (Hrsg. v. H. AUTRUM, R. JUNG, W. R. LÖWENSTEIN, D. M. MCKAY, H. L. TEUBER, Bd. VII/4, Visual Psychophysics. Berlin/Heidelberg/New York: Springer 1972; S. 643-59
- [52] GRÜTZNER, P., u. A. KOHLRAUSCH, Farbenfehlsichtigkeit oder Macula-Absorption. Farbe **14** (1965), S. 32-38
- [53] GRÜTZNER, P., u. A. KOHLRAUSCH, Der Lichtverlust in der Macula lutea und das Farbensehen von Deuteranomalien. Pflügers Arch. ges. Physiol. **274** (1961), S. 318-330
- [54] HEINSIUS, E., Effects of the beginning of macula degeneration on colour-vision tests. In: Intern. Symposium on Acquired Colour Vision Deficiencies, Gent 1971. (= Mod. Probl. Ophthalm. Bd. 11) (Basel: Karger 1972); S. 106-10
- [55] HEINSIUS, E., Zur Farbenwahrnehmung der Farbenuntüchtigen im Farbensinnstörungsdreieck und ihre Bedeutung für die Diagnostik der Farbensinnstörungen. Der ärztliche Dienst **30** (1969), S. 147-150; Nr. 11
- [56] HEINSIUS, E., Über die verschiedenen Formen der Trichromasie, sowie über die Grenze zwischen Farbentüchtigkeit und Farbenuntüchtigkeit. Klin. Mbl. Augenheilkunde **135** (1959), Seite 95-107, Nr. 1
- [57] HERING, E., Über die von v. KRIES wider die Theorie der Gegenfarben erhobenen Einwände. Pflügers Arch. ges. Physiol. **42** (1888), S. 488-506
- [58] HÖFLING, O., Lehrbuch der Physik, Ausgabe A, Bonn: Dümmler 1959; S. 520-565
- [59] HOSoya, J., T. OKITA u. T. AKUNE, Über die lichtempfindliche Substanz in der Zapfennetzhaut. Tohoku J. exp. Med. **34** (1938), S. 532-541
- [60] HURVICH, L. M. u. D. JAMESON, Colour vision. Ann. Rev. Psychol. **11** (1960), S. 99-121
- [61] HURVICH, L. M., The opponent pairs scheme. In: Mechanisms of colour discrimination. (Symposium Paris 1958) London 1960; S. 199-212
- [62] HURVICH, L. M., u. D. JAMESON, Does anomalous color vision imply color weakness? Psychol. Sci. **1** (1964), S. 11-12
- [63] INGLING, C. R., u. J. R. INGLING, A tetrachromatic hypothesis for human color vision. Vision Res. **9** (1969), S. 1131-1148
- [64] JAEGER, W., u. P. GRÜTZNER, Erworbene Farbensinnstörungen. Entwicklung und Fortschritt, In: Augenheilkunde, Fortbildungskurs für Augenärzte (Hamburg 1962), Stuttgart: Enke 1963
- [65] JAEGER, W., P. LUX, P. GRÜTZNER u. K. H. JESSEN, Subjektive und objektive spektrale Helligkeitsverteilung bei angeborenen und erworbenen Farbensinnstörungen. In: Neurophysiologie und Psychophysik des visuellen Systems. (Symposium Freiburg/Br. 1960) Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer 1961; S. 199-208
- [66] JAENSCH, P. A., Die Untersuchung am Anomaloskop. Der ärztliche Dienst **1954**, Nr. 2
- [67] JAMESON, D., [Ausführungen in der Schlußsitzung.] In: Mechanism of colour discrimination. (Symposium Paris 1958) London 1960; S. 261-271
- [68] JAMESON, D., u. L. M. HURVICH, Some quantitative aspects of an opponent colors theory. J. opt. Soc. Amer. **45** (1955), S. 546-552, 602-616; **46** (1956), S. 405-421
- [69] JAMESON, D., u. L. M. HURVICH, Opponent-response functions related to measured cone pigments. J. opt. Soc. Amer. **58** (1968), S. 429-430
- [70] JUDD, D. B., Color perceptions of deuteranopic and protanopic observers. J. opt. Soc. Amer. **39** (1949), S. 252-256

- [71] JUDD, D. B., Standard response functions for protanopic and deutanopic vision. *J. opt. Soc. Amer.* **35** (1945), S. 199-220
- [72] JUDD, D. B., u. G. WYSZECKI, *Color in Business, Science, and Industry*. New York: Wiley 1963
- [73] JUSTOVA, E. N., Zur Frage des Einflusses der Farbstimmung des Auges auf die Genauigkeit von Farbmessungen (Russ.). *Ž. techn. Fiziki* **16** (1946), S. 1187-1194; Nr. 10
- [74] JUSTOVA, E. N., Die Bestimmung der Koordinatenachsen im physiologischen Grundsystem aus Versuchen mit Farbenblinden (Russ.). *Dokl. Akad. Nauk UdSSR* **63** (1948), S. 383-385, Nr. 4
- [75] JUSTOVA, E. N., Zur Frage über die Natur des Farbensehens der anomalen Trichromaten (Russ.). *Dokl. Akad. Nauk UdSSR* **81** (1951), S. 1051-1054; Nr. 6
- [76] KARMA, A., Dark adaptation in dichromate and anomalous trichromate. *Acta Ophthalm.* **49** (1971), S. 211-220
- [77] KÖNIG, A. u. C. DIETERICI, Die Grundempfindungen in normalen und anomalen Farbensystemen und ihre Intensitätsverteilung im Spektrum. *Z. Psych. u. Physiol. d. Sinnesorgane* **4** (1892), S. 241-327 (s. a. [82], S. 214-321)
- [78] KÖNIG, A., Über „Blaublintheit“. *Sitz-Ber. Akad. Wiss. Berlin* **1897**, S. 718-731 (s. a. [82], S. 396-415)
- [79] KÖNIG, A., Über den menschlichen Sehpurpur und seine Bedeutung für das Sehen. *Akad. Wiss. Berlin* **30** (1894), S. 577-598 (s. a. [82], S. 338-363)
- [80] KÖNIG, A., Über Newtons Gesetz der Farbmischung und darauf bezügliche Versuche d. Herrn Eugen Brodhun. *Sitz-Ber. Akad. Wiss. Berlin* **1887**, S. 311-317 (s. a. [82], S. 108-115)
- [81] KÖNIG, A., Über den Ort der Schnittpunkte der Intensitätskurven für die drei Grundempfindungen im normalen Auge. *Verh. physik. Ges. Berlin* **1883**; Nr. 4, S. 24-26 (s. a. [82], S. 1-3)
- [82] KÖNIG, A., *Gesammelte Abhandlungen zur Physiologischen Optik* (hrsg. v. Th. Engelmann). Leipzig: J. A. Barth 1903.
- [83] KÖNIG, A., Über die neuere Entwicklung von Thomas Young's Farben-theorie. *Naturwiss. Rdsch.* **1886**, S. 457-464 (s. a. [82], S. 88-107)
- [84] KÖNIG, A., Zur Kenntnis dichromatischer Farbensysteme. *Wiedemanns Ann. Physik u. Chemie*, **22** (1884), S. 567-578 (s. a. [82], S. 11-22)
- [85] KÖNIG, A., u. C. DIETERICI, Die Grundempfindungen und ihre Intensitätsverteilung im Spektrum. *Sitz-Ber. Akad. Wiss. Berlin* **1886**, S. 805-29 (s. a. [82], S. 60-87)
- [86] KOHLRAUSCH, A., Die angebliche Tritanopie der Fovea-Mitte. *Farbe* **4** (1955), S. 240; Nr. 4/6
- [87] KOHLRAUSCH, A., Das Arbeiten mit dem Helmholtz-Königischen Spektralfarbenmischapparat. *Farbe* **1** (1952/53), 11-23, 66-77
- [88] KOHLRAUSCH, A., et al. Das Farbensehen der anomalen Trichromaten und der Dichromaten (Kurzmitt.). *Pflügers Arch. ges. Physiol.* **270** (1959), S. 28; Nr. 1
- [89] v. KRIES, J., Über die anomalen trichromatischen Farbensysteme. *Z. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorgane* **19** (1898), S. 63-69
- [90] v. KRIES, J., Beitrag zur Physiologie der Gesichtsempfindungen. *Arch. Physiol. Abt.* (1878), S. 503-524
- [91] v. KRIES, J., u. F. KÜSTER, Über angeborene Farbenblindheit. *Arch. Physiol.*, (1879), 513-524
- [92] v. KRIES, J., u. W. A. NAGEL, Über den Einfluß von Lichtstärke und Adaptation auf das Sehen des Dichromaten (Grünblinden). *Z. Psychol. Physiol. Sinnesorg.* **12** (1896), S. 1-38

- [93] v. KRIES, J., Normale und anomale Farbensysteme. In: H. Helmholtz, Handbuch der physiologischen Optik. 3. Aufl. (Hamburg u. Leipzig: Voß 1911), Bd. 2, S. 333-354.
- [94] v. KRIES, J., Theoretische Studien über die Umstimmung des Sehorgans. Festschrift Universität Freiburg 1902, S. 144-158
- [95] v. KRIES, J., Die Gesichtsempfindungen. In: Die Physiologie der Sinne, Bd. 3. (Braunschweig: Vieweg 1904) S. 109-282
- [96] v. KRIES, J., Die Theorien des Licht- und Farbensinnes. In: H. v. Helmholtz, Handbuch der physiol. Optik, 3. Aufl. (Hamburg/Leipzig: Voss 1911) Bd. 2, S. 354-378
- [97] v. KRIES, J., Über Farbsysteme. Z. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorgane **13** (1897), S. 241-324
- [98] KUSCHINSKY, G., Taschenbuch der modernen Arzneibehandlung. 5. Aufl., Stuttgart: Thieme 1970, S. 310
- [99] LADD-FRANKLIN, Chr., Change in relative brightness of whites of different physical constitution as seen in photopic vision. *Nature* **40** (1893), S. 517
- [100] LEBER, T., Über das Vorkommen von Anomalien des Farbensinnes bei Krankheiten des Auges. *Graefes Arch. Ophthalm.* **15** (1869), S. 26-107
- [101] LEGRAND, Y., *Light, Colour and Vision*. London: Chapman & Hall 1957. 2. Aufl.
- [102] LEGRAND, Y., Standard response functions for protanopic and deuteranopic vision. *J. opt. Soc. Amer.* **38** (1948), S. 815-816; Nr. 6
- [103] LEGRAND, Y., Vue d'ensemble sur les schémas psychophysiques. In: *Mechanism of colour discrimination*. (Symposium Paris 1958) hrsg. London 1960, S. 223-241
- [104] LEGRAND, Y., Color theories and their implication in color vision. *Visual Problems of Colour* (Symposium Teddington 1957) London 1958; S. 569-575
- [105] LIEB, W. A. u. H. KNAUF, Über die Ultrastruktur der Photorezeptoren der Netzhaut. *Klin. Mbl. Augenheilkde.* **145** (1964), S. 663-667; Nr. 5
- [106] LOBANOVA, N. V. u. G. N. RAUTIAN, Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit der Netzhautrezeptoren aus Versuchen mit Dichromaten. (Russ.) *Dokl. Akad. Nauk UdSSR* **146** (1962), S. 1193-1196; Nr. 5
- [107] LOOF, H., *Farbe und Forschung*. Carl Zeiss, Oberkochen/Württ. (1967)
- [108] MACADAM, D. L., Color vision, *Physics today* **1** (1948), Nr. 1, S. 10-13; 30-31
- [109] MACNICHOL, E. F., L. MACPHERSON u. G. SVAETICHIN, Studies on spectral response curves from the fish retina. In: *Visual Problems of Colour* (Symposium Teddington 1957) London 1958, S. 529-536
- [110] MACNICHOL, E. F., u. G. SVAETICHIN, Electric responses from isolated retinas of fishes. *Amer. J. Ophthalm.* **46** (1958), S. 26-39
- [111] MACNICHOL, E. F., Retinal mechanisms of color vision. *Vision Res.* **4** (1964), S. 119-133
- [112] MACNICHOL, E. F., R. FEINBERG u. F. I. HÁROSI, Colour discrimination processes in the retina. In: *Colour 73*, [Proc.] 2nd AIC Congress York 1973. London: A. Hilger 1973; S. 191-251
- [113] MARKS, W. B., W. H. DOBELLE u. E. F. MACNICHOL, Visual pigments of single primate cones. *Science* **143** (1964), S. 1181-1183
- [114] MARRÉ, M., The investigation of acquired colour vision deficiencies. In: *Colour 73*, [Proc.] 2nd AIC York 1973 (London: Hilger 1973; S. 99-135)
- [115] MARRÉ, M., Clinical examination of the three color vision mechanisms in acquired colour vision defects. In: *Intern. Symposium on Acquired Colour Vision Deficiencies Gent 1971* (= *Mod. Probl. Ophthalm.*, Bd. 11), (Basel: Karger 1972); S. 224-227

- [116] MAXWELL, J. C., On the theory of compound colours and the relations of the colours of the spectrum. *Proc. Roy. Soc.* **10** (1860), S. 404-409; 484-486;
- [116a] MAXWELL, J. C., On colour vision. *Proc. Roy. Inst. Gr. Brit.* **6** (1872), S. 260-271
- [117] MITCHELL, D. E., u. W. A. RUSHTON, Visual pigments in dichromats. *Vision Res.* **11** (1971), S. 1033-1043
- [118] MITCHELL, D. E., u. W. A. RUSHTON, The red-green pigments of normal vision. *Vision Res.* **11** (1971), S. 1045-1056
- [119] MÜLLER, H., Zur Histologie der Netzhaut. *Z. wiss. Zoologie* **3** (1851), S. 234-237
- [120] NAGEL, W. A., Beiträge zur Diagnostik, Symptomatologie und Statistik der angeborenen Farbenblindheit. *Arch. Augenheilkde.* **38** (1898), S. 31-66
- [121] NAGEL, W. A., Duplizitätstheorie und Dämmerungssehen. In: H. v. Helmholtz, *Handbuch der physiologischen Optik*, 3. Aufl. (Hamburg/Leipzig: Voß 1911), S. 290-332
- [122] NIMEROFF, I., Deuteranopic convergence point. *J. opt. Soc. Amer.* **60** (1970), S. 966-969
- [123] NODDACK, W., u. H. JARCZYK, Der Nachweis der Farbsebstoffe im lebenden menschlichen Auge. **4** (1955), S. 59-78; Nr. 2/3
- [124] NYBERG, N. D., u. E. N. JUSTOVA, Untersuchungen des Farbsehens bei Dichromaten (Russ.). *Trudy gos. opt. Inst.* **24** (1955), Nr. 143, S. 33-93
- [125] NUBERG, N. D., u. E. N. YUSTOVA, Researches on dichromatic vision and the spectral sensitivity of the receptors of trichromats. In: *Visual Problems of Colour discrimination (Symposium Teddington 1957)* London 1958; Bd. 2, S. 475-486
- [126] OHYE, KEN-ICHI, The diameter of cone in the fovea centralis. *Acta Soc. ophthalm. Jap.* **72** (1968), S. 1403-1404
- [127] OPPEL, O., Über einige spezielle Aspekte zur Entwicklung des Sehapparates. *Klin. Mbl. Augenheilkde.* **148** (1966), S. 332-339; Nr. 3
- [128] PITT, F. H. G., Some aspects of anomalous vision. *Documenta ophthalmol.* **3** (1949), S. 307-317
- [129] PITT, F. H. G., Characteristics of dichromatic vision (with an appendix on anomalous trichromatic vision). *Medical Res. Council Reports of the Committee upon the Physiology of Vision XIV. Special Report Series* **200** (London 1955)
- [130] PITT, F. H. G., The nature of normal trichromatic and dichromatic vision. *Proc. Roy. Soc.* **B 132** (1944), S. 101-117
- [131] POLGAR, J., Z. ERDEI, L. BALLA u. G. SZEGHY, Mittels Ophthalmodynamometer auslösbare Störung des Farbensinns. *Graefes Arch. Ophthalm.* **178** (1969), S. 130-131
- [132] POLYAK, S. L., *The Retina*. Univ. Press 1941
- [134] POLYAK, S. L., Retinal structure and colour vision. *Docum. ophthalmol.* **3** (1949), S. 24-46
- [135] RAPOPORT, S. M., *Medizinische Biochemie*. Berlin: VEB-Verlag 1969; S. 459; 891-896
- [136] RAYLEIGH, LORD, Experiments on colour. *Nature (London)* **25** (1881), S. 64-66
- [137] REMBERG, H., Die Empfindlichkeit der Protanopen und Deutanopen für Wellenlängenunterschiede und die photoelektrischen Wirkungen der Strahlung im Zapfen. *Farbe* **4** (1955), S. 39-57; Nr. 2/3
- [138] RICHARDS, W., Color-mixture functions at low luminance levels. *Vision Res.* **4** (1964), S. 281-313
- [139] RICHARDS, W., u. S. M. LURIA, Recovery and spectral sensitivity curves for color-anomalous observers. *Vision Res.* **8** (1968), S. 929-938

- [140] RICHTER, K., New opponent colour concept. In: Proc. 1st AIC Congress Stockholm 1969, (Göttingen: Musterschmidt 1970) S. 403-417
- [141] RICHTER, M., Ergebnisse von Farbsehrprüfungen in färberischen Betrieben. *Farbe* **2** (1953), S. 175-192; Nr. 5/6
- [142] RICHTER, M., Wesen und Bedeutung des Farbvalenz-Begriffes. *Farbe* **3** (1954), S. 49-60; Nr. 1/2
- [143] RICHTER, M., Das farbreizmetrische Grundgesetz. *Z. wiss. Photogr.* **43** (1948), S. 246-251, Nr. 11/12
- [144] RICHTER, M., Über einige neue Theorien des Farbensehens. *Klin. Mbl. Augenheilkde.* **118** (1951), S. 240-259; Nr. 3
- [144a] RICHTER, M., Gedanken über Farbsysteme. *Farbe* **16** (1967), S. 121-130; Nr. 1/6
- [145] RICHTER, M., Die neuere Entwicklung auf dem Gebiet der Farbensinnprüfung. *Klin. Mbl. Augenheilkde.* **119** (1951), S. 561-575; Nr. 6
- [146] RICHTER, M., Das physiologische Helligkeitsmaß. *Farbe* **5** (1956), S. 179-184; Nr. 3/6
- [147] RICHTER, M., Ausgestaltung des Nagelschen Anomaloskops zu einem „Tritoskop“. *Farbe* **6** (1957), S. 5-6; Nr. 1/2
- [148] RICHTER, M., Grundriß der Farbenlehre der Gegenwart. Dresden: Steinkopff 1940; S. 46-53
- [149] RICHTER, M., u. H. TERSTIEGE, Demonstration der Entstehung der Spektralwertkurven. *Farbe* **17** (1968), S. 209-223; Nr. 5/6
- [149a] RICHTER, M., u. H. WEISE, Demonstration der Grundlagen der Farbvalenzmetrik. *Farbe* **12** (1963), S. 219-236; Nr. 1/6
- [150] RICKLEFS, G., u. D. WENDE, Kann ein Farbschwacher Radio- oder Fernseh-techniker bzw. -mechaniker werden? *Klin. Mbl. Augenheilkde.* **148** (1966), S. 148-149; Nr. 1
- [151] RICKLEFS, G., u. D. WENDE, Anforderungen der Elektroindustrie an das Farbsehen. *Klin. Mbl. Augenheilkde.* **148** (1966), S. 280-282
- [152] RUDDOCK, K. H., u. C. J. BURTON, The organisation of human colour vision at the central fovea. *Vision Res.* **12** (1972), S. 1763-1769
- [153] RUSHTON, W. A. H., Foveal photopigments in normal and colour-blind. *J. Physiol.* **129** (1955), S. 41-42
- [154] RUSHTON, W. A. H., Measurement of a visual pigment in the human eye. *Farbe* **4** (1955), S. 219-220; Nr. 4/6
- [155] RUSHTON, W. A. H., Pigments in anomalous colour vision. *Brit. med. Bull.* **26** (1970), S. 179-181
- [156] RUSHTON, W. A. H., Visual pigments in the colour blind. *Nature (London)* **182** (1958), S. 690-692
- [157] RUSHTON, W. A. H., The difference spectrum and the photosensitivity of rhodopsin in the living eye. *J. Physiol.* **134** (1956), S. 30-46; Nr. 1
- [158] RUSHTON, W. A. H., The rhodopsin density in the human rods. *J. Physiol.* **134** (1956), S. 30-46; Nr. 1
- [159] RUSHTON, W. A. H., Physical measurement of cone pigment in the living human eye. *Nature* **179** (1957), S. 571-573; Nr. 459
- [160] RUSHTON, W. A. H., The cone pigments of the human fovea in colour blind and normal. In: *Visual Problems of colour (Symposium Teddington 1957)*. London: 1958, Bd. 1, S. 71-101
- [161] RUSHTON, W. A. H., A cone pigment in the protanope. *J. Physiol.* **168** (1963), S. 345-359
- [162] RUSHTON, W. A. H., A foveal pigment in the deuteranope. *J. Physiol.* **176** (1965), S. 24-37
- [163] RUSHTON, W. A. H., u. H. D. BAKER, Red/green sensitivity in the normal vision. *Vision Res.* **4** (1964), S. 75-85

- [164] RUSHTON, W. A. H., u. F. W. CAMPBELL, Measurement of rhodopsin in the living human eye. *Nature* **174** (1954), S. 1096-1097
- [165] RUSHTON, W. A. H., F. W. CAMPBELL, W. A. HAGINS u. G. S. BRINDLEY, The bleaching and regeneration of rhodopsin in the living eye of the albino rabbit and of man. *Opt. Acta* **1** (1955), S. 183-190; Nr. 4
- [166] RUSHTON, W. A. H., u. R. D. COHEN, Visual purple level and the course of dark adaptation. *Nature* **173** (1954), S. 301-302
- [167] SCHEIBNER, H., Untersuchungen zur Farbumstimmung des menschlichen Auges. Diss. TH Karlsruhe 1963; auch: *Farbe* **12** (1963), S. 6-58
- [168] SCHELLENBECK, R., u. S. SCHLEICHER, Zur Differenzierung der Farbsinnstörung bei einem Fall von hereditärem Maculaleiden und Protanopie. *Klin. Mbl. Augenheilkde.* **157** (1970), S. 673-675; Nr. 5
- [169] SCHMIDT, I., Ergebnis einer Massenuntersuchung des Farbensinns mit dem Anomaloskop. *Z. Bahnärzte* **1936**, Nr. 2, S. 1-10
- [170] SCHMIDT, I., Über manifeste Heterozygote bei Konduktorinnen für Farbensinnstörungen. *Klin. Monatsbl. Augenheilkde.* **92** (1934), S. 456-471
- [171] SCHMIDT, I., On congenital tritanomaly. *Vision Res.* **10** (1970), S. 717-743
- [172] SCHOBER, H., Das Sehen. Leipzig: Fachbuchverl. 1957/58. 2 Bde.
- [173] SEELEN, W., Zur Informationsverarbeitung im visuellen System der Wirbeltiere. I. *Kybernetik* **7** (1970), S. 43-60; Nr. 2
- [174] SEELEN, W., Zur Informationsverarbeitung im visuellen System der Wirbeltiere. II. *Kybernetik* **7** (1970), S. 87-106; Nr. 3
- [175] SHIPLEY, T., Rod-cone duplexity and the autonomic action of light. *Vision Res.* **4** (1964), S. 155-177
- [176] SPEELMAN, R. G., u. J. KRAUSKOPF, Effects of chromatic adaptation on normal and dichromatic red-green brightness matches. *J. opt. Soc. Amer.* **53** (1963), S. 1103-1107; Nr. 9
- [177] SPERANSKAJA, N. J., Determination of spectrum color coordinates for twenty-seven normal observers. *Optics and Spectroscopy* **7** (1959), Nr. 5, S. 424-428
- [178] SPERANSKAJA, N. J., u. N. N. LOBANOVA, Bestimmung der Kurven der Spektralempfindlichkeit der Empfänger im Auge normaler Trichromaten (russ.) *Biofizika* **6** (1961), Nr. 4, S. 472-477
- [179] SPERLING, H. G., Case of congenital tritanopia with implications for a trichromatic model of color reception. *J. opt. Soc. Amer.* **50** (1960), S. 156-163; Nr. 2
- [180] SRZEDNICKA, K., Modelle des Gesichtsfeldes für Weiß, Rot und Grün. *Klin. Mbl. Augenheilkde.* **147** (1965), S. 258-260; Nr. 2
- [181] STILES, W. S., The trichromatic scheme. In: *Mechanisms of colour discrimination* (Symposium Paris 1958) London 1960; S. 187-195
- [182] STILES, W. S., The directional sensitivity of the retina and the spectral sensitivities of the rods and cones. *Proc. Roy. Soc.* **127 B** (1939), Nr. 846, S. 64-105
- [183] STUCKMANN, C., Farbenfehlsichtigkeit und Farbtauglichkeit. *Farbe* **14** (1965), S. 274-277
- [184] v. STUDNITZ, G., Über die Lichtabsorption der Retina und die photosensiblen Substanzen der Stäbchen und Zapfen. *Pflügers Arch. ges. Physiol.* **230** (1932), S. 614-638
- [185] v. STUDNITZ, G., Zapfensubstanz und Sehpurpur. *Naturwiss.* **23** (1941), S. 65-77; Nr. 5/6
- [186] v. STUDNITZ, G., u. H. K. LOEVENICH, Zur medikamentösen Beeinflussung des Farbensinns. *Naturwiss.* **33** (1946), S. 189-190; Nr. 6
- [187] v. STUDNITZ, G., Sehvorgang und Sehstoffe. *Klin. Mbl. Augenheilkde.* **118** (1951), S. 1-15; 225-240
- [188] TERSTIEGE, H., Untersuchungen zum Persistenzsatz und Koeffizientensatz. *Farbe* **16** (1967), S. 1-111; Nr. 1/6 (Diss. TU Berlin 1967)

- [189] TERSTIEGE, H., Der Einfluß von Sehstoff-Konzentrationsänderungen auf Farbgleichungen. Tag.-Ber. Intern. Farbtagung Luzern 1965 (Göttingen: Musterschmidt 1966); S. 141-153
- [190] THOMSON, L. C., u. W. D. WRIGHT, The convergence of the tritanopic confusion loci and the derivation of the fundamental response functions. *J. opt. Soc. Amer.* **43** (1953), S. 890-894; Nr. 10
- [191] TREDELENBURG, W., *Der Gesichtssinn*. 2. Aufl. Berlin/Heidelberg: Springer 1961; S. 69-127
- [192] TREDELENBURG, W., Zur Diagnostik des abnormen Farbensinnes. *Klin. Mbl. Augenheilkde.* **83** (1929), S. 721-723
- [193] TREDELENBURG, W., u. I. SCHMIDT, Untersuchungen über Vererbung von angeborener Farbenfehlsichtigkeit. *Sitz.-Ber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin, physik.-math. Kl.* **28/II** (1935), S. 13-81
- [194] TREDELENBURG, W., Ein Anomaloskop zur Untersuchung von Tritoformen der Farbenfehlsichtigkeit mit spektraler Blaugleichung. *Klin. Mbl. Augenheilkde.* **106** (1941), S. 537-546
- [195] TREDELENBURG, W., Quantitative Untersuchungen über die Bleichung des Sehpurpurs in monochromatischem Licht. *Z. Sinnesphysiol.* **37** (1904), S. 1-55
- [196] VAILLANT, W., Farbensinnprüfung mit dem Anomaloskop. *Licht* **13** (1943), S. 74-76; Nr. 4/6
- [197] VALENTINER, S., *Vektoren und Matrizen*. Berlin: de Gruyter 1967 (= Sammlung Göschel 354/354a)
- [198] DE VALOIS, R. L., Physiological basis of color vision. *Proc. 1st AIC Congress „Color 69“*, Stockholm 1969 (Göttingen: Musterschmidt 1970), S. 29-48
- [199] DE VALOIS, R. L., u. G. H. JACOBS, Primate color vision. *Science* **162** (1968), S. 533-540
- [200] DE VALOIS, R. L., et al., Analysis of response patterns of LGN cells. *J. opt. Soc. Amer.* **56** (1966), S. 977
- [201] DE VALOIS, R. L., G. H. JACOBS, A. E. JONES, Response of single cells in primate red-green color vision system. *Optik* **20** (1963), S. 87-98; Nr. 2
- [202] DE VALOIS, R. L., Color vision mechanisms in the monkey. *J. ges. Physiol.* **43** (1960), S. 115-128; Nr. 6
- [203] VELHAGEN, K., Zur Frage der Farbentüchtigkeit im Straßenverkehr. *Klin. Mbl. Augenheilkde.* **104** (1939), S. 377-384
- [204] VERRIEST, G., Further studies on acquired deficiency of color discrimination. *J. opt. Soc. Amer.* **53** (1963), S. 185-195
- [205] VERRIEST, G., Les déficiences acquises de la discrimination chromatique. *Mém. Acad. Roy. Méd. Belg.*, II/IV/5, 35-327, Bruxelles (1964)
- [206] VERRIEST, G., The spectral curve of relative luminous efficiency in acquired colour-vision deficiency. *Proc. 1st AIC Congress „Color 69“* Stockholm 1969 (Göttingen: Musterschmidt 1970), Bd. 1, S. 115-130
- [207] DE VRIES, H., The fundamental response curves of normal and abnormal dichromatic and trichromatic eyes. *Physica* **14** (1948), S. 367-380; Nr. 6
- [208] DE VRIES, H., The luminosity curve of the eye as determined by measurements with the flicker photometer. *Physica* **14** (1948), S. 319-348; Nr. 5
- [209] VILLEGAS, G. M., Electron microscopic study of the vertebrate retina. *J. ges. Physiol.* **43** (1960), S. 15-43; Nr. 6
- [210] VOLA, J. L., M. RISS, G. E. YAYLE, A. GROSSET u. A. TASSY, Acquired deficiency of colour vision in lateral homonymous hemianopsia. *Intern. Symposium on Acquired Colour Vision deficiencies* Gent 1971 (= *Med. Probl. Ophthal.*, Bd. 11, Basel: Karger 1972; S. 150-159)
- [211] WAALER, G. H. M., Über die Erbliehkeitsverhältnisse der verschiedenen Arten von angeborener Rotgrünblindheit. *Z. indukt. Abstammungs- u. Vererbungsbl.* **45** (1927), S. 279-333

- [212] WAGNER, H. G., Valenzmetrische Untersuchungen der Farbumstimmung. *Farbe* **17** (1968), S. 229-284; Nr. 5/6
- [213] WALD, G., Human vision and the spectrum. *Science* **101** (1945), S. 633-658
- [214] WALD, G.: Retinal chemistry and the physiology of vision. In: *Visual Problems of colour* (Symposium Teddington 1957) hrg. London 1958; S. 7-61
- [215] WALD, G., The receptors of human colour vision. *Science* **145** (1964), S. 1007-1017
- [216] WALLS, G. L., and G. G. HEATH, Neutral points in 138 protanopes and deutanopes. *J. opt. Soc. Amer.* **46** (1956), S. 640-649
- [217] WALRAVEN, P. L., On the mechanisms of colour vision. Inst. for Perception RVO-TNO Nat. Defence Res. Org. TNO, Soesterberg 1962 (Niederlande)
- [218] WATKINS, R. D., Foveal increment thresholds in normal and deutan observers. *Vision Res.* **9** (1969), S. 1185-1196
- [219] WATKINS, R. D., Foveal increment thresholds in protan observers. *Vision Res.* **9** (1969), S. 1197-1204
- [220] WEALE, R. A., Cone-monochromatism. *J. Physiol.* **121** (1953), S. 548-563; Nr. 3
- [221] WEALE, R. A., Photo-sensitive reactions in fovea of normal and cone-monochromatic observers. *Optica Acta* **6** (1959), S. 158-173; Nr. 2
- [221a] WEISE, H., Farbe als physiologisch-physikalische Erscheinung. *Pelikan* (1972), Nr. 73, S. 15-19
- [222] WEISE, H., u. B. KOSMATH, Über den Stoffwechsel topographisch verschiedener Netzhautareale. *Graefes Arch. Ophthalm.* **180** (1970), S. 171-181
- [223] WESSELS, H.-G., Tageslicht und Farbensinnprüfung. *Der ärztliche Dienst* **30** (1969), Nr. 11, S. 151-153
- [224] WOLKEN, J. J., Structure and molecular organization of retinal photo-receptors. *J. opt. Soc. Amer.* **53** (1963), S. 1-19; Nr. 9
- [225] WRIGHT, W. D., Defective colour vision. *Brit. med. Bull.* **9** (1953), S. 36-40; Nr. 1
- [226] WRIGHT, W. D., A new look at 37 years of research. *Vision Res.* **4** (1964), S. 63-74
- [227] WRIGHT, W. D., *Researches on Normal and Defective Colour Vision*. London: H. Kimpton 1946
- [228] WRIGHT, W. D., *The Measurement of Colour*. London: A. Hilger 1944/1964
- [229] WRIGHT, W. D., A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours. *Trans. Opt. Soc. (London)* **30** (1928/29), S. 141-164
- [230] WRIGHT, W. D., The breakdown of a colour match with high intensities of adaptation. *J. Physiol.* **87** (1936), S. 23-33; Nr. 1
- [231] WRIGHT, W. D., The characteristics of tritanopia. *J. opt. Soc. Amer.* **42** (1952), S. 509-521
- [232] WYSZECKI, G., *Farbsysteme*. Göttingen: Musterschmidt 1960
- [233] WYSZECKI, G., u. W. S. STILES, *Color Science*. New York: Wiley 1967
- [234] WYSZECKI, G., Beitrag zur valenzmetrischen Untersuchung der Umstimmung. *Farbe* **3** (1954), S. 93-104, Nr. 3/4
- [235] WYSZECKI, G., Valenzmetrische Untersuchung des Zusammenhanges zwischen normaler und anomaler Trichromasie. *Farbe* **2** (1953), S. 39-52
- [236] ZIMMERMANN, U., Farbensinnstörungen bei Glaukom. *Klin. Mbl. Augenheilkde.* **148** (1966), S. 845-849; Nr. 6
- [237] ZOLLINGER, H. U., *Pathologische Anatomie I*, 2. Aufl. (1969), S. 290
- [238] ZURMÜHL, R., *Matrizen*. Berlin: Springer 1958

Lebenslauf

Als einziger Sohn des Kapitäns BENDIX JOHANNES VOGT und seiner Ehefrau KÄTHE, geb. ALBERS, wurde ich, GUIDO VOGT, am 22. Juli 1945 in Glücksburg, Kreis Flensburg, geboren.

Von Ostern 1952 bis Ostern 1955 besuchte ich die *Wilhelminen-Schule* in Schleswig, anschließend bis Ostern 1963 die *Domschule* in Schleswig. 1966 bestand ich am *Gymnasium Satrup* das Abitur.

Ich bin seit dem Sommersemester 1966 an der *humanmedizinischen Fakultät der Freien Universität Berlin* immatrikuliert. Am 13. April 1967 bestand ich die Naturwissenschaftliche Vorprüfung und am 9. Juli 1969 die Ärztliche Vorprüfung. Das medizinische Staatsexamen beendete ich am 4. Mai 1973.

